



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

**ZPRACOVÁNÍ FERMENTAČNÍCH ZBYTKŮ
Z BIOPLYNOVÝCH STANIC**

FERMENTATION REMAINDER TREATMENT IN A BIOGAS PLANT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Oto Budín

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Mgr. Marek Vondra

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství
Student: **Bc. Oto Budín**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Procesní inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Mgr. Marek Vondra**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Zpracování fermentačních zbytků z bioplynových stanic

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Fermentační zbytky jsou vedlejším produktem anaerobní fermentace biomasy v bioplynových stanicích. Obsahují velké množství živin, proto jsou zpravidla využívány jako zemědělská hnojiva. Jejich nevýhodou je však vysoký obsah vody a s ním spojená nízká koncentrace živin, která pro provozovatele bioplynových stanic znamená vysoké náklady na skladování a přepravu. Ke snížení nákladů by mohlo přispět odvodnění těchto fermentačních zbytků, musí však být pro provozovatele ekonomicky atraktivní. Diplomová práce, která podrobně zmapuje integraci vybrané odvodňovací technologie do bioplynové stanice, bude přínosem pro další úvahy o využití této technologie v praxi.

Cíle diplomové práce:

1. Vypracování teoretického úvodu k problematice nakládání fermentačních zbytků z bioplynových stanic.
2. Tvorba látkové a energetické bilance bioplynové stanice.
3. Návrh integrace vybrané odvodňovací technologie v bioplynové stanici (umístění v procesu, doplnění o potřebné aparáty, vliv na látkové a energetické toky).
4. Zhodnocení návrhu včetně vlivu na ekonomiku provozu.

Seznam literatury:

DROSG, B., FUCHS, W., AL SEADI, T., MADSEN M. a LINKE, B. 2015. Nutrient Recovery by Biogas Digestate Processing [online]. IEA Bioenergy. ISBN 978-1-910154-16-8. Dostupné z: www.iea-biogas.net/files/daten-redaktion/download/Technical%20Brochures/NUTRIENT_RECOVERY_RZ_web1.pdf

BUDÍN O. Nakládání s odpady z bioplynových stanic. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Mgr. Marek Vondra.

Strategická výzkumná agenda oboru bioplyn [online]. 2014. Czech Biogas Association. Dostupné z: http://www.czba.cz/files/ceska-bioplynova-asociace/uploads/files/SVA_CzBA_2014_FINAL.pdf

AL SEADI, T., RUTZ, D., PRASSL, H., KÖTTNER, M., FINSTERWALDER, T., VOLK S. a JANSSEN, R. 2008. Biogas handbook. Esbjerg: University of Southern Denmark Esbjerg. ISBN 978-87-992962-0-0.

PERRY, R.H., GREEN, D.W. a MALONEY, J.O. Perry's chemical engineers' handbook. 7th ed. New York: McGraw-Hill, 1997, 1 sv. (různé stránkování). ISBN 0-07-049841-5.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 4. 11. 2016



prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá odvodňovacími technologiemi fermentačních zbytků (FZ) z bioplynových stanic (BPS) a klade si za cíl navrhnout integraci vybrané technologie do provozu BPS. FZ (neboli digestát), jež jsou vedlejším produktem anaerobní fermentace biomasy v BPS, obsahují jisté množství živin a bývají zpravidla využívány jako zemědělská hnojiva. Vysoký obsah vody ve FZ a s ním spojená nízká koncentrace živin však zvyšují náklady na jejich skladování a přepravu. Odvodnění zfermentovaného materiálu by mohlo přispět ke snížení těchto nákladů.

Hlavní náplní této práce je návrh integrace zvolené odvodňovací technologie v BPS – její umístění do procesu, doplnění o potřebné aparáty, vliv na látkové a energetické toky. V tomto případě je zvolena dvoufázová úprava FZ. Nejprve separace pevné (separát) a kapalné (fugát) frakce prostřednictvím šnekového lisu a následné zahuštění fugátu odpařovacím procesem ve vícestupňové odparce. Součástí diplomové práce je rovněž zhodnocení návrhu, včetně jeho vlivu na ekonomiku provozu.

Klíčová slova

Digestát, fugát, separát, separace, odpařování, bioplynová stanice, hnojivo, materiálová a energetická bilance

Bibliografická citace

BUDÍN, O. *Zpracování fermentačních zbytků z bioplynových stanic*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 68 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Mgr. Marek Vondra.

Abstract

This diploma thesis deals with dewatering technologies of fermentation residues from biogas plants and aims to design an integration of selected technology into the biogas plant. Fermentation residues (or digestate), which are a by-product of anaerobic biomass fermentation in biogas plants, contain a certain amount of nutrients and are usually used as agricultural fertilizers. However, the high-water content in digestate and the associated low nutrient concentration increase the cost of its storage and transport. Dewatering of fermented material could help reduce these costs.

The main part of this work included the design of an integration of the selected dewatering technology into the biogas plant – its placement in a process, an addition of necessary appliances, the influence on material and energy flows. In this case, the fermentation residues are processed in two phases. First, a separation of the solid and the liquid fraction by a screw press. The second step is to thicken the liquid digestate by evaporation in a multistage evaporator. Evaluation of the design of a dewatering technology, including its impact on the economy of the biogas plant, is also part of the diploma thesis.

Keywords

Digestate, liquid digestate, solid digestate, evaporation, biogas plant, fertilizer, material and energy balance

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Zpracování fermentačních zbytků z bioplynových stanic* vypracoval samostatně a že jsem veškeré literární a obrazové prameny správně a úplně citoval.

V Brně dne 26. května 2017

Bc. Oto Budín

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval všem, kteří mě během mého studia podporovali a pomohli mi na této cestě dojít až sem. Děkuji vedoucímu své diplomové práce Ing. Mgr. Marku Vondrovi za cenné rady a připomínky a také za to, že jsme plynule navázali na příjemnou spolupráci, jež započala při tvorbě mé bakalářské práce.

Největší poděkování patří mým rodičům, kteří mi umožnili studovat a bezmezně mě během této životní etapy podporovali. Děkuji vám, mami a tati. Obrovský dík patří rovněž mé sestře Jitce, s kterou jsme společně prožívali radostné a někdy i lehce krušné okamžiky našich studentských let.

V neposlední řadě bych rád poděkoval všem blízkým, kamarádům a spolužákům, jenž mně byli oporou a pomáhali mi.

Obsah

| | |
|---|-----------|
| 1 ÚVOD | 1 |
| 2 BIOPLYNOVÁ STANICE, BIOPLYN, DIGESTÁT | 2 |
| 2.1 BIOPLYNOVÁ STANICE JAKO TECHNOLOGICKÉ ZAŘÍZENÍ | 2 |
| 2.2 VSTUPNÍ SUROVINY | 5 |
| 2.3 BIOPLYN | 6 |
| 2.3.1 Složení, vlastnosti a využití bioplynu | 8 |
| 2.4 DIGESTÁT | 9 |
| 2.4.1 Vlastnosti digestátu | 10 |
| 2.4.2 Digestát jako hnojivo | 12 |
| 3 ZPRACOVÁNÍ DIGESTÁTU | 14 |
| 3.1 SEPARACE DIGESTÁTU | 15 |
| 3.1.1 Šnekový lis | 16 |
| 3.1.2 Dekantační odstředivka | 17 |
| 3.1.3 Pásové separátory | 18 |
| 3.2 ZPRACOVÁNÍ PEVNÉ FRAKCE DIGESTÁTU | 19 |
| 3.2.1 Kompostování | 19 |
| 3.2.2 Sušení digestátu | 20 |
| 3.2.3 Karbonizace | 21 |
| 3.3 ZPRACOVÁNÍ KAPALNÉ FRAKCE DIGESTÁTU | 22 |
| 3.3.1 Stripování amoniaku | 22 |
| 3.3.2 Vysrážení struvitu | 23 |
| 3.3.3 Membránové technologie | 24 |
| 3.3.4 Odpařování | 25 |
| 4 MATERIÁLOVÁ A ENERGETICKÁ BILANCE BIOPLYNOVÉ STANICE | 27 |
| 4.1 MEB OBECNÉ BPS | 29 |
| 4.1.1 Materiálová bilance obecné BPS | 30 |
| 4.1.2 Energetická bilance obecné BPS | 37 |
| 4.2 MEB BPS S ODVODŇOVACÍ TECHNOLOGIÍ DIGESTÁTU | 40 |
| 4.2.1 Materiálová bilance BPS s odvodňovací technologií | 42 |
| 4.2.2 Energetická bilance BPS s odvodňovací technologií | 47 |
| 5 ZHODNOCENÍ NÁVRHU ODVODŇOVACÍ TECHNOLOGIE DIGESTÁTU | 50 |
| 6 ZÁVĚR | 56 |
| SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY | 58 |
| SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ, INDEXŮ A ZKRATEK | 62 |
| SEZNAM OBRÁZKŮ | 66 |
| SEZNAM TABULEK | 67 |
| SEZNAM PŘÍLOH | 68 |

1 Úvod

Bioplynové stanice (BPS) jsou zařízení, ve kterých se anaerobními procesy rozkládá biomasa za vzniku bioplynu. Bioplyn představuje jeden z alternativních zdrojů energie. Nejčastěji se využívá ke kombinované výrobě elektrické a tepelné energie přímo v BPS (bioplyn se spaluje v kogeneračních jednotkách, jež jsou součástí BPS). Elektrická energie bývá distribuována do rozvodné elektrické sítě (RES), přebytečné teplo je možné použít např. k vytápění přilehlých objektů, sušení materiálů či rovněž může být dodáváno do veřejné sítě centrálního zásobování teplem (CZT).

Vedle bioplynu produkují BPS fermentační zbytky (FZ). FZ (neboli digestát) jsou sekundárním výstupem anaerobního rozkladu biologických materiálů. Jedná se o zkvášený, stabilizovaný materiál v kapalně podobě, jehož vlastnosti jsou závislé na charakteru a složení vstupních substrátů či na provozních parametrech procesu (tj. na teplotě ve vyhnívací nádrži, době zdržení materiálu v nádrži aj.). FZ bývají nejčastěji využívány ke hnojení zemědělské půdy. Kvalitní digestát představuje hnojivo s obsahem organických látek a minerálních živin, jehož pozitivní účinky na pěstování zemědělských plodin jsou potvrzeny odbornými výzkumy a zkouškami.

Prostý digestát vycházející z fermentoru (tj. nádrže, ve které probíhá anaerobní rozklad biomasy) obsahuje značné množství vody – degradačními procesy klesne podíl sušiny o 50 až 80 % oproti výchozímu materiálu a podíl vody v surovém FZ je více než 90 %. Neupravený digestát je tedy poměrně zředěný s ohledem na obsah živin. S tímto jsou spojené vyšší náklady na dopravu při aplikaci FZ na zemědělské půdě a také na jeho skladování. Snahou proto je redukovat objem digestátu a zvýšit tak koncentraci živin v něm obsažených.

Existuje řada technologií pro zpracování digestátu z BPS. Prvotní úprava FZ spočívá v oddělení pevné a kapalně frakce. K tomu se využívá např. šnekových lisů, dekantačních odstředivek či pásových separátorů. Pevnou frakci (separát) lze buď přímo využít, např. jako hnojivo či podestýlku pro dobytek, nebo může být dále upravována, např. kompostována či sušena. Z usušeného separátu se mohou vyrábět tuhá alternativní paliva. Tekutá frakce (fugát) se zpravidla rovněž dále upravuje. Zde je k dispozici celá řada procesů, které vedou k zahuštění fugátu a vyčištění odpadní vody. Tato diplomová práce nabízí přehled odvodňovacích technologií FZ.

Hlavním cílem diplomové práce je návrh integrace vybrané odvodňovací technologie v BPS. V tomto případě je zvoleno zpracování digestátu ve dvou krocích: separace pevné a kapalně frakce šnekovým lisem a následné zahuštění fugátu prostřednictvím odpařovacího systému. Samotné integraci zmíněné technologie do BPS předchází materiálová a energetická bilance zvolené BPS bez odvodňovacích zařízení. Poté již následuje návrh integrace odvodňovací technologie v BPS zahrnující umístění technologie v procesu, doplnění o potřebné aparáty a posouzení vlivu na látkové a energetický toky v BPS. Závěrečná část diplomové práce se věnuje vzájemnému porovnání obou druhů BPS a zhodnocení návrhu včetně jeho vlivu na ekonomiku provozu.

2 Bioplynová stanice, bioplyn, digestát

Bioplynová stanice (BPS) je zařízení, které zpracovává organický materiál a vyrábí elektrickou a tepelnou energii. Přesnější definice BPS stanice může znít např. takto: Bioplynová stanice představuje technologické zařízení, které díky procesu anaerobní digesce zpracovává biologicky rozložitelný materiál a současně produkuje bioplyn, který lze využít jako zdroj energie [1]. Uvedená definice bude objasněna v rámci této kapitoly.

BPS představuje typické procesní zařízení, tedy zařízení, do něhož vstupují suroviny, které se vlivem probíhajícího procesu mění na produkty. Vstupními surovinami (substráty) jsou v tomto případě organické materiály, jako např. hnůj, kejda, kukuřičná siláž, travní senáž, biologicky rozložitelné odpady (BRO), vedlejší živočišné produkty (VŽP) aj. Proces, ke kterému v BPS dochází, se nazývá anaerobní digesce (fermentace). Dle podílu sušiny ve vstupním substrátu je možné rozlišit dvě základní technologie BPS – mokrá a suchá fermentace. U mokré fermentace, jenž je zastoupena u většiny BPS, se podíl sušiny v materiálu pohybuje do 12 %. V případě použití vstupních surovin s vyšším podílem sušiny se před vstupem do zařízení materiál naředí procesní vodou [2]. Během anaerobní digesce dochází k rozkladu organické hmoty působením metanových bakterií. Při této reakci se uvolňuje plyn – bioplyn, který je hlavním produktem fermentace. Bioplyn je tvořen převážně metanem (50-75 %) a oxidem uhličitým (20-50%). Tento plyn představuje obnovitelnou alternativu k zemnímu plynu a lze jej využít mnoha způsoby, např. k vytápění, výrobě elektrické energie a tepla či jako pohonnou hmotu [3]. Fermentačním procesem se rozloží pouze určitá část substrátu, zbývající podíl odchází z tohoto procesu ve formě tzv. digestátu. Digestát je stabilizovaný materiál v kapalně podobě, který používá se např. jako hnojivo či jako surovina pro kompostování [4]. Digestát (fermentační zbytek) lze tak považovat za vedlejší produkt anaerobní digesce. V této kapitole bude detailněji představena BPS s technologií mokré fermentace, její provoz, vstupní suroviny a produkty.

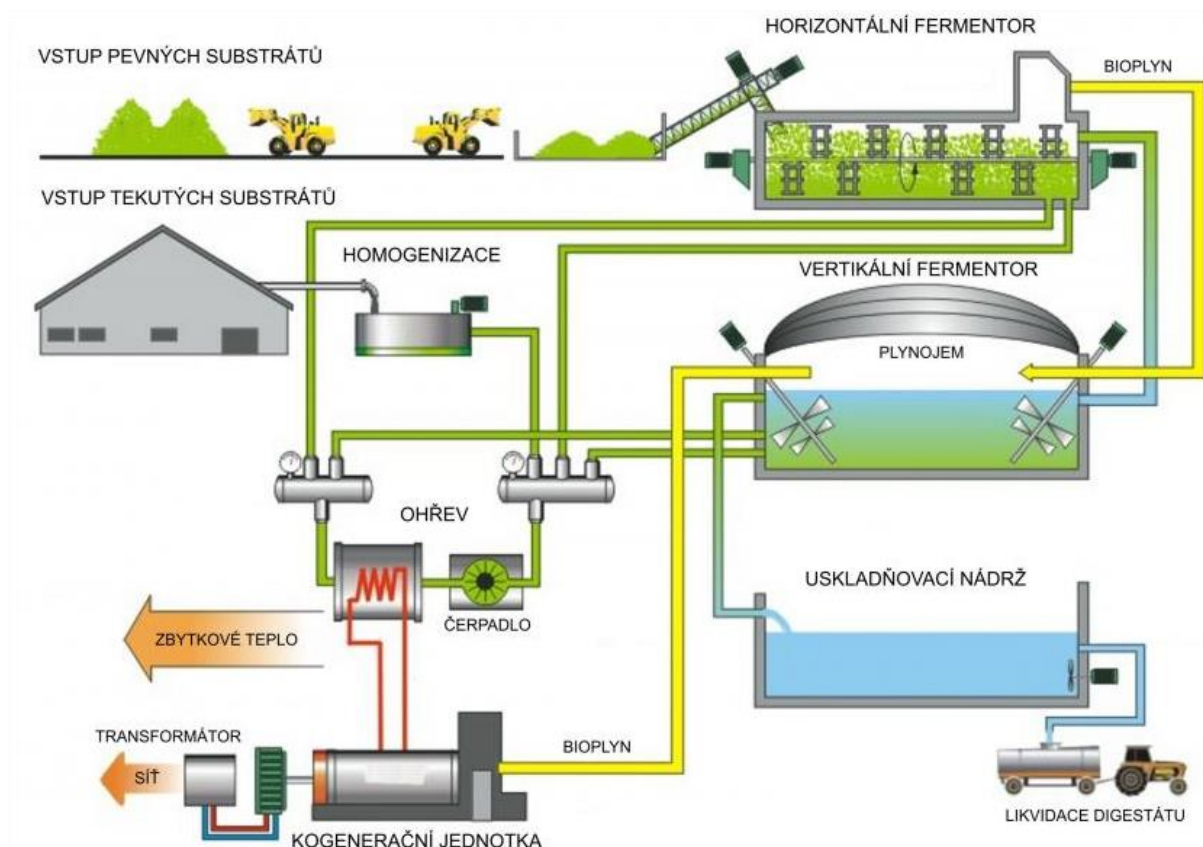
2.1 BIOPLYNOVÁ STANICE JAKO TECHNOLOGICKÉ ZAŘÍZENÍ

BPS je v zásadě tvořena několika hlavními aparáty, které jsou navzájem propojeny a vytváří jednotný technologický celek. Obrázek 1 schematicky znázorňuje obecnou BPS. Za stěžejní aparáty obecné BPS se považují *fermentor*, *plynojem*, *kogenerační jednotka* a *uskladňovací nádrž*. Tok látek v BPS je následující: substrát vstupuje do fermentoru. Ve fermentoru se rozkládá organický materiál a vzniká bioplyn. Bioplyn pokračuje přes plynojem nejčastěji do kogenerační jednotky, kde jeho spalováním vzniká elektrická energie a teplo. Zfermentovaný materiál je z fermentoru odváděn do uskladňovací nádrže a lze jej dále využít např. ke hnojení. Nyní budou detailněji popsána některá zařízení BPS.

FERMENTOR

Fermentor představuje uzavřenou nádrž, do které vstupují vhodné materiály (substrát) ke zpracování. V této nádrži se odehrává hlavní proces v rámci BPS – tedy vznik bioplynu. Název *fermentor* byl odvozen od slova fermentace. *Fermentace* je proces přeměny organických látek, během něhož působením mikroorganismů a jejich enzymů vznikají látky energeticky chudší [6]. Ve fermentorech tak dochází k rozkladu organické hmoty.

Přesněji řečeno zde probíhá *anaerobní fermentace*, tedy fermentace bez přístupu vzduchu. Během degradačního procesu se ze substrátu uvolňuje kýžený bioplyn. Pro správný průběh fermentačního procesu jsou nádrže vybaveny míchadly, které vytváří rovnoměrné podmínky prostředí a zabraňují tvorbě plovoucích vrstev [7]. Rovněž je nutné (v našich zeměpisných šířkách) fermentory vytápět, aby byla zajištěna požadovaná teplota uvnitř reaktoru pro správnou funkci a vyšší účinnost procesu. K vytápění se využívá teplo z kogenerační jednotky [8].



Obrázek 1: Schéma BPS [5]

Z obrázku 1 je patrné, že mohou existovat fermentory horizontální či vertikální. K přednostem *horizontálních fermentorů* patří možnost instalace mechanického míchadla, kterým lze docílit dobrého promíchávání napříč směrem průtoku a tzv. pístového proudění¹. Naopak jejich nevýhodou je nutnost dostatečně velkého prostoru na umístění nádrže, nadměrná velikost povrchu nádrže k jejímu objemu (značné tepelné ztráty) a také nemožnost očkovaní čerstvého substrátu bakteriální flórou vyhnílého kalu [7].

Vertikální fermentory jsou často řešeny jako nadzemní či částečně zapuštěné, cylindrické, ocelobetonové nádrže s plynotěsným víkem. Zastřešení nádrží velkého průměru je poměrně obtížné a nákladné, dalším nedostatkem vertikálních fermentorů je možnost tvorby plovoucích dek a usazenin na dně (tyto problémy lze řešit použitím míchadel). Naproti tomu výhody těchto nádrží spočívají v možnosti proměnného provozu, údržby a opravy míchacích zařízení bez nutnosti vyprázdnění fermentoru a relativně nižších celkových nákladech při objemu zařízení přes 300 m³ [8].

¹ Pistové proudění ve fermentoru označuje jev, kdy je dávka materiálu posunována rourou jako píst a nedochází tak ke smíchávání čerstvého substrátu s vyhnílym, což podporuje hygienizační efekt [7].

PLYNOJEM

Bioplyn vznikající ve fermentorech je třeba jímat a uskladnit v plynojemu. Tím se eliminují aktuální rozdíly v produkci bioplynu a lze tak zajistit rovnoměrnou dodávku paliva do kogenerační jednotky.

Nejvíce jsou rozšířeny nízkotlaké zásobníky ve formě fóliových plynojemů. Tyto plynojemy bývají řešeny ve formě fóliových poklopů fermentorů nebo odděleně jako externí nádrže. Výhodou fóliových zásobníků je jednoduchá výroba, maximální využití vnitřního prostoru plynojemu, dostatečné utěsnění proti úniku metanu. Plynojemy je třeba chránit před vnějšími vlivy, např. větrem [7].

KOGENERAČNÍ JEDNOTKA

Kogenerační jednotka (KJ) je zařízení, v němž se zpracovává (spaluje) upravený bioplyn, a výsledkem tohoto procesu je zisk elektrické a tepelné energie, které lze dále využívat. U BPS se nejčastěji využívají KJ s pístovými spalovacími motory. Hlavní části KJ jsou spalovací motor, generátor elektrické energie a systém výměníků tepla [8]. KJ tedy přeměňuje energii bioplynu na energii tepelnou a elektrickou. Elektrická energie je distribuována do veřejné sítě, část tepla se používá k vytápění fermentorů a zbytek tepla se buď maří do okolí nebo může být také využíván (např. k vytápění objektů, ohřevu užitkové vody apod.). Efektivní provoz² kogenerační jednotky má velký vliv na ekonomickou udržitelnost projektu [9].

USKLADŇOVACÍ NÁDRŽ

Uskladňovací nádrž slouží k jímání zfermentovaného materiálu – digestátu před jeho dalším zpracováním. Digestát se převážně aplikuje na zemědělskou půdu jako hnojivo. S tímto faktem úzce souvisí velikost uskladňovací nádrže. Sklad digestátu musí být dimenzován tak, aby byl schopen pojmout veškerý materiál během tzv. období vegetačního klidu rostlin (jinými slovy během období, kdy nedochází ke hnojení zemědělské půdy) [7]. Při skladování hospodářských hnojiv či digestátu může docházet k emisím metanu (CH_4) a oxidu dusného (N_2O), které patří k plynům zvyšující skleníkový efekt, dále k uvolňování amoniaku (NH_3) a látek způsobujících zápach [8]. Z tohoto důvodu bývá také uskladňovací nádrž kryta fóliovým poklopem či pevným stropem. Díky zastřešení skladu digestátu lze navíc jímat plyn vznikající dokvašováním fermentačního zbytku [7]. Uskladňovací nádrže bývají rovněž vybaveny mechanickými míchadly.

² Jedním z hlavních kritérií, jež určuje efektivnost provozu KJ, je elektrická účinnost, která udává množství elektřiny vyrobené z m^3 bioplynu [9].

2.2 VSTUPNÍ SUROVINY

Jak již bylo zmíněno, bioplyn vzniká rozkladem organických látek. K rozkladu organických materiálů může docházet aerobní či anaerobní cestou. V BPS probíhá anaerobní fermentační proces. Pro tento případ rozkladu materiálu se více hodí kapalný, mokrá substrát (např. kejda, zbytky jídla, tuky atd.) Tedy suroviny s nižším obsahem sušiny (optimálně obsah sušiny mezi 5 a 15 %³) [7].

Substráty zpracovávané v BPS mohou být složené z těchto surovin [2]:

- výstupy z chovu hospodářských zvířat (hnůj, kejda, podestýlky atd.)
- cíleně pěstovaná biomasa (např. kukuřice, řepa, senáž, vojtěška)
- bioodpady z domácností a zahrad, veřejné zeleně (tráva, listí)
- zbytky z jídelen a restaurací, prošlé potraviny a bioodpady ze supermarketů
- bioodpady z podnikatelských provozů (pekárny, lihovary, pivovary, cukrovary, masokombináty)

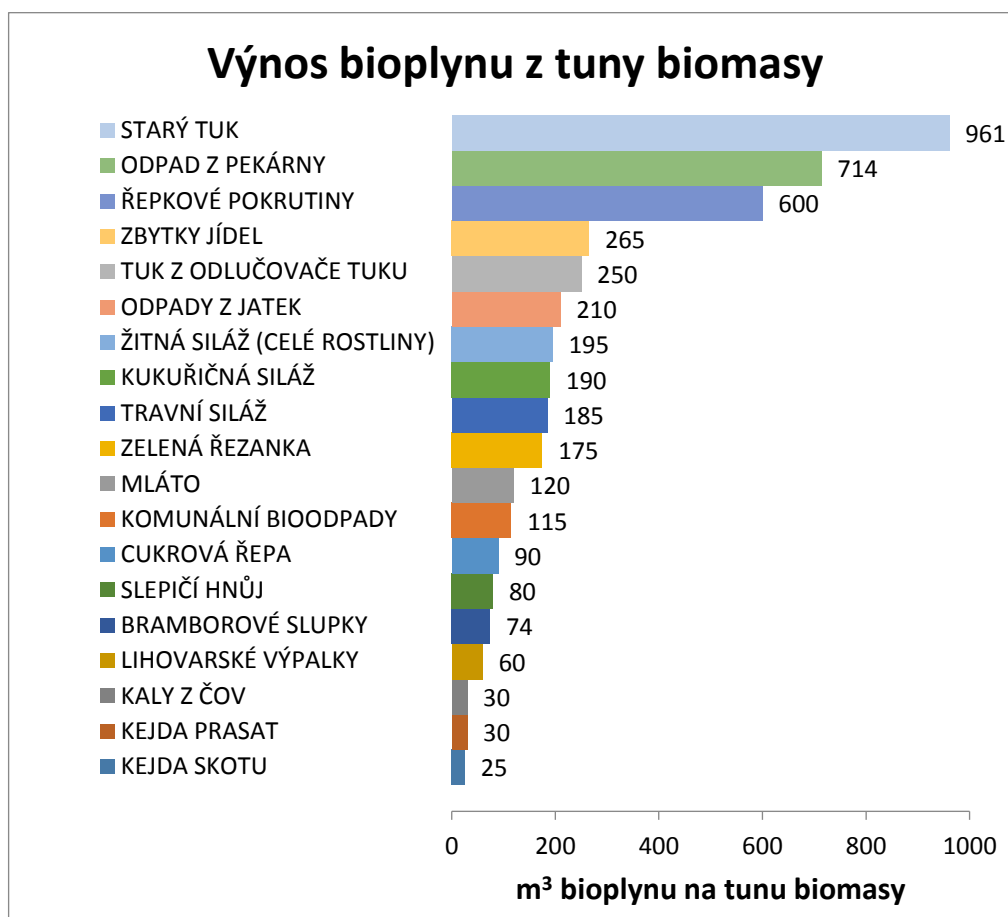
Na základě vstupních surovin je možné BPS rozdělit do tří skupin: zemědělské BPS, průmyslové BPS a komunální BPS. Jak již název napovídá, *zemědělské BPS* zpracovávají materiály ze zemědělských provozů. Patří sem statková hnojiva (hnůj, kejda) a energetické plodiny (např. kukuřice). Tyto BPS bývají součástí areálu zemědělských provozů a v tuzemsku se vyskytují nejčastěji. V substrátu *průmyslových BPS* se nacházejí nějaké rizikové vstupy, např. jateční odpady, kaly z ČOV a podobně. Tyto materiály jsou ve fermentorech zpracovávány samostatně či spolu s dalšími surovinami. Vstupní surovinou *komunálních BPS* jsou biologicky rozložitelné komunální odpady (BRKO). Mezi ně se řadí odpad z údržby zeleně, vytríděné bioodpady z domácností či stravovacích provozů a podobně [10].

V BPS jde především o zpracování biologických materiálů za účelem získání bioplynu. Jednotlivé vstupní suroviny disponují rozdílnou výtěžností bioplynu. Obrázek 2 zobrazuje teoretickou výtěžnost bioplynu z běžně používaných surovin.

Přímý vliv na výtěžnost bioplynu má také způsob provozu zařízení, doba zdržení materiálu ve fermentoru, výše a stabilita teploty v reaktoru. Nesprávně zvolené podmínky procesu a substrát mohou mít za následek nižší výnos bioplynu, dokonce i zastavení fermentačních procesů [11].

Pro optimální provoz BPS je nutné zajistit dostatečné množství kvalitních vstupních surovin. Proto je vhodné bioplynové stanice lokalizovat do míst s dostatkem těchto surovin, např. zemědělské BPS v areálu zemědělského provozu [2].

³ Při obsahu sušiny ve vstupním materiálu pod 5 % se fermentační proces stává neekonomickým. Naopak substrát s obsahem sušiny nad 15 % je obtížné čerpat, mísit a promíchávat [7].



Obrázek 2: Teoretická výtěžnost bioplynu z jednotlivých surovin [2]

2.3 BIOPLYN

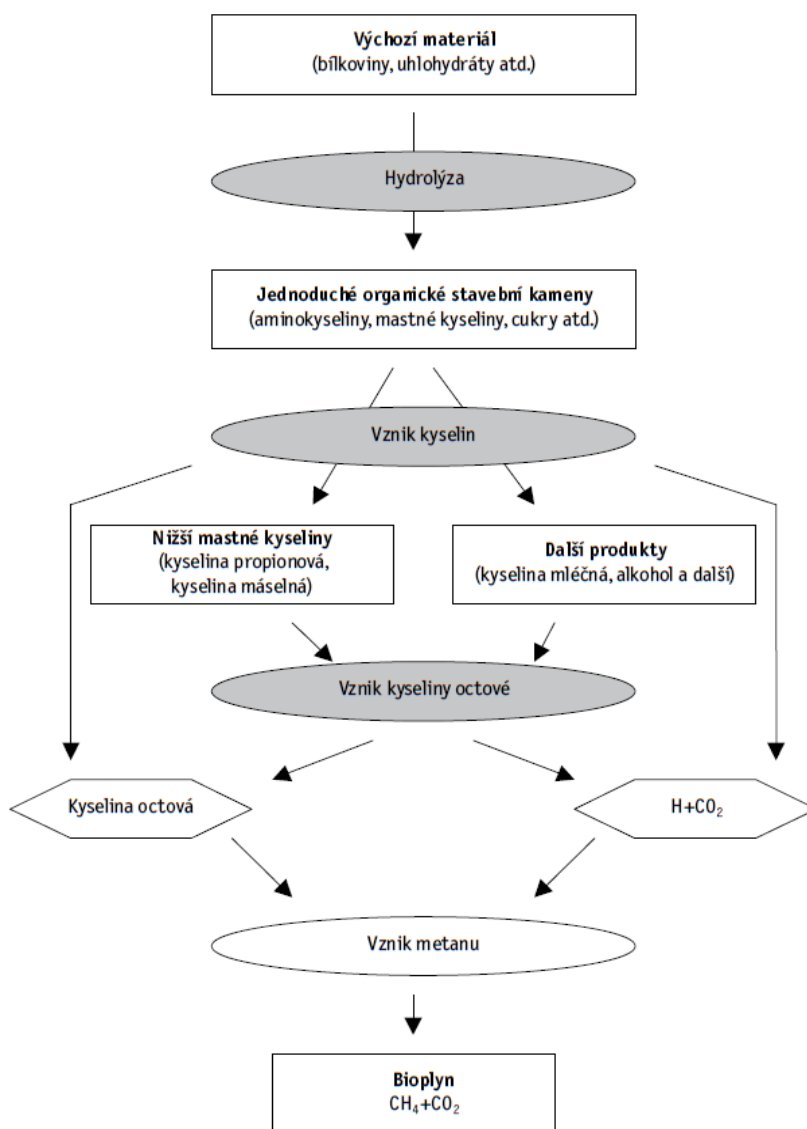
Bioplyn je plyn, který vzniká při vyhnívání organické hmoty. Rozklad organických látek se uskutečňuje působením metanových bakterií při teplotě v rozmezí 0 až 70 °C, ve vlhkém prostředí a bez přístupu vzduchu. K těmto procesům dochází na mnoha místech v přírodě, např. v močálech a rašeliništích, v usazeninách moří, řek a jezer, v hnojištích, jímkách kejdy apod. [7].

V BPS je rozkladný proces řízen a bioplyn zde vzniká účelně. Produkce bioplynu se odehrává v několika dílčích krocích, které shrnuje obrázek 3. V rámci fermentačního procesu bakterie přeměňují komplexní sloučeniny výchozího materiálu (např. polysacharidy, bílkoviny, tuky) na jednodušší organické sloučeniny (např. aminokyseliny, monosacharidy, mastné kyseliny). V další fázi dochází k rozkladu meziproduktů na nižší mastné kyseliny (octovou, propionovou a máselnou) a v závěrečném kroku (metanogenezi) se tvoří metan, který je hlavní složkou bioplynu [8].

Jak již bylo zmíněno, na produkci bioplynu se podílejí bakterie. Proto je potřeba jim zajistit optimální podmínky pro jejich „maximální výkon“. K optimálním provozním podmínkám přispívá [7], [8]:

- Vlhké prostředí – podíl vody v materiálu alespoň 50 %.
- Zabránění přístupu kyslíku – přítomnost kyslíku může vést k zahubení bakterií.

- Zabránění přístupu světla – světlo brzdí fermentační proces.
- Stálá teplota – optimální teplota pro bakterie je od 25 do 70 °C ⁴.
- Hodnota pH – hodnota pH by měla být okolo 7,5.
- Přísun živin pro bakterie – ideální poměr živin v substrátu je $C:N:P:S = 600:15:5:1$.
- Omezení inhibitorů – zpomalují či zastavují proces (např. Na, K, Ca, Mg, S, těžké kovy).



Obrázek 3: Proces anaerobního rozkladu [8]

⁴ Bioplynové bakterie je možné rozdělit na základě jejich tepelného optima do tří skupin: psychofilní, mezofilní a termofilní. Pro jednotlivé skupiny se optimální teplota pohybuje v různém rozmezí, nicméně obecně pro všechny typy bakterií je ideální procesní teplota v intervalu od 20 do 70 °C. Většina známých metanových bakterií má své optimum při teplotě okolo 40 °C [8].

2.3.1 Složení, vlastnosti a využití bioplynu

Bioplyn představuje směs plynů, ve které přibližně ze dvou třetin převládá metan (CH_4), zbývající část tvoří především oxid uhličitý (CO_2) a stopové množství zbytkových plynů: vodní pára (H_2O), sirovodík (H_2S), dusík (N_2), kyslík (O_2) aj. Průměrné složení bioplynu uvádí tabulka 1.

| Sloučenina | Chemický vzorec | Koncentrace [% obj.] |
|---------------|-----------------------------|----------------------|
| Metan | CH_4 | 55–70 |
| Oxid uhličitý | CO_2 | 30–45 |
| Dusík | N_2 | 0–5 |
| Kyslík | O_2 | <1 |
| Uhlovodíky | $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ | <1 |
| Sirovodík | H_2S | 0–0,5 |
| Amoniak | NH_3 | 0–0,05 |
| Vodní pára | H_2O | 1–5 |

Tabulka 1: Průměrné složení bioplynu [12]

Kvalita bioplynu se posuzuje dle obsahu metanu, který má přímý vliv na výsledek získané energie. Podíl metanu v bioplynu vychází především ze složení použitého substrátu, přesněji z podílu tuků, bílkovin a sacharidů v materiálu (nejvyšší měrné výtěžnosti metanu se dosahuje u tuků, nejméně u sacharidů). Jistou roli v tomto směru hrají také obsah vody v substrátu, fermentační teplota, doba zdržení, předzpracování substrátu a jeho stupeň rozkladu [8].

Tabulka 2 nabízí srovnání hlavních spalovacích parametrů bioplynu a jiných energetických plynů. Výhřevnost bioplynu se pohybuje mezi 5,5 a 6,0 kWh/m³, což je méně než třeba u zemního plynu. Hustota 1,2 kg/m³ (hustota vzduchu při normálních podmínkách je 1,29 kg/m³ [13]) naznačuje, že se bioplyn nehromadí u země (jako např. propan), nýbrž stoupá vzhůru. Během stoupání se bioplyn mísí se vzduchem a zmenšuje se tak nebezpečí hoření nebo výbuchu. Vyšší zápalná teplota rovněž představuje příznivý faktor z hlediska bezpečnosti. Zrovna tak nižší rychlost postupu plamene ve vzduchu, která je zapříčiněna příměsí CO_2 [7].

K přednostem bioplynu patří skladovatelnost, upravitelnost a možnost mnohostranného použití [7]. Upravený bioplyn je možné použít např. jako palivo automobilů či ho lze přivádět do sítě zemního plynu [8]. Dále může být bioplyn použit k vaření, vytápění či na přípravu teplé vody, sušení, chlazení a napájení infračervených zářičů [7]. Nejčastěji je však využíván k výrobě elektrické energie a tepla v kogeneračních jednotkách, které jsou součástí BPS.

| Parametr | | Bioplyn | Zemní plyn | Propan | Metan | Vodík |
|---|--------------------------------|---------|------------|--------|-------|-------|
| Výhřevnost | kWh/m ³ | 6 | 10 | 26 | 10 | 3 |
| Hustota | kg/m ³ | 1,2 | 0,7 | 2,01 | 0,72 | 0,09 |
| Zápalná teplota | °C | 700 | 650 | 470 | 650 | 585 |
| Max. rychlost postupu plamene ve vzduchu | m/s | 0,25 | 0,39 | 0,42 | 0,47 | 0,43 |
| Rozsah zápalné koncentrace plynu ve vzduchu | % | 6–2 | 5–15 | 2–10 | 5–15 | 4–80 |
| Teoretická potřeba vzduchu | m ³ /m ³ | 5,7 | 9,5 | 23,9 | 9,5 | 2,4 |

Tabulka 2: Spalovací parametry bioplynu a dalších hořlavých plynů [7]

Nicméně, i před aplikací plynu v KJ je nutná jeho úprava – z důvodu přítomnosti vodní páry a sulfanu v bioplynu⁵. Úprava spočívá v odsiřování a sušení bioplynu. Odsiřování může probíhat biologickými, chemickými nebo fyzikálními postupy a může k němu docházet přímo ve fermentoru nebo mimo plynovod. Sušení bioplynu se děje jeho ochlazením v plynovodu a následným odváděním kondenzátu pomocí odlučovače kondenzátu [8].

2. 4 DIGESTÁT

Digestát (fermentační zbytek) je sekundárním výstupním produktem anaerobního rozkladu biologických materiálů v BPS. Jedná se o zkvašený, stabilizovaný materiál v kapalné podobě [4]. Při fermentačním procesu se rozkládají organické látky, stabilnější z nich zůstávají a společně s některými minerálními a organickými nutrienty tvoří digestát [14].

Vznik digestátu označuje termín *digesce*. Digesce v BPS představuje proces, jenž je velmi podobný přirozeným pochodům běžně se vyskytujícím v přírodě, např. v močálech, rašeliníštích, trávicím ústrojí skotu apod. Digesce je založena na anaerobním rozkladu a přeměně organických látek [12].

Zfermentovaný materiál je po určité době odveden z fermentoru do uskladňovací nádrže, kde je skladován do svého dalšího použití. Před samotnou aplikací digestátu jej lze různým způsobem upravit. Jednou ze základních úprav digestátu je separace pevné složky (separát) od kapalné (fugát). Možnostem zpracování FZ se věnuje kapitola 3.

Upravený či výchozí digestát lze využít k různým účelům. Např. jako surovinu pro výrobu kompostu, jako rekultivační materiál či k výrobě tuhých alternativních paliv. Nejčastěji se však FZ aplikuje na zemědělskou půdu jako hnojivo.

⁵ Vodní pára a sulfan společně vytvářejí kyselinu sírovou, která koroduje motory KJ, plynovody, vedení odpadních plynů atd. [8]. Proto je dobré bioplyn před jeho vstupem do KJ čistit.

2.4.1 Vlastnosti digestátu

Fyzikálně-chemické vlastnosti digestátu se liší, jsou závislé na charakteru a složení vstupních substrátů a také na provozních parametrech procesu (tj. teplota ve fermentoru, doba zdržení, obsah sušiny apod.). Ve srovnání se zvířecími hnojivy a kaly má digestát nižší celkový obsah sušiny a organického uhlíku, nižší poměr C:N a nižší viskozitu. Na druhou stranu má vyšší hodnotu pH a podíl amonných iontů ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) [15]. Průměrné vlastnosti jsou shrnuty v tabulce 3.

| Parametr | Jednotka | Hodnota |
|-------------------------------------|----------|---------|
| <i>Sušina</i> | % hm. | 8,7 |
| <i>Organická sušina</i> | % hm. | 5,3 |
| <i>pH</i> | - | 8,3 |
| <i>N_{tot}</i> | % hm. | 0,42 |
| <i>NH₄⁺-N</i> | mg/l | 2148 |
| <i>NO₃⁻-N</i> | mg/l | 5,85 |
| <i>C/N</i> | - | 6,58 |
| <i>P₂O₅</i> | % hm. | 0,39 |
| <i>K₂O</i> | % hm. | 0,35 |
| <i>CaO</i> | % hm. | 0,30 |
| <i>MgO</i> | % hm. | 0,09 |

Tabulka 3: Průměrné vlastnosti a složení digestátu [16]

Digestát obsahuje o 50 až 80 % méně sušiny než výchozí materiál. Toto zmenšení podílu sušiny je způsobeno rozložením velké části sloučenin uhlíku, obsaženého v organické sušině vstupního materiálu, na metan (CH_4) a oxid uhličitý (CO_2), tedy bioplyn [8]. Podíl sušiny v digestátu se pohybuje v rozmezí 2,7 – 9,3 % [12]. Obsah sušiny závisí hlavně na počátečním obsahu sušiny v substrátu a také na obsahu snadno rozložitelných organických hmot. Až 70 % sušiny digestátu je tvořeno organickými látkami, které při aplikaci do půdy přispívají k tvorbě humusu [15].

Hodnota pH digestátu se obvykle pohybuje v rozmezí 7,5 až 8,8 (surový hnůj má pH 7,1) [16]. Vyšší hodnota pH naznačuje degradaci nepříjemně zapáchajících mastných kyselin (snížení emisí zápachu), ale také vyšší těkavost amoniaku (digestát musí být aplikován vhodnou zemědělskou technikou, aby nedošlo k překročení emisí amoniaku) [15].

Fermentační proces degraduje organické sloučeniny dusíku na amonné ionty $\text{NH}_4^+\text{-N}$. Tato forma dusíku je při hnojení digestátem přímo dostupná rostlinám a její obsah ve FZ určuje kvalitu digestátu jako dusíkatého hnojiva [16]. Podíl amonných iontů v digestátu je úměrný celkovému obsahu dusíku N_{tot} v substrátu. Koncentrace dusíku v FZ je ovlivněna i procesními parametry – množství čerstvé vody přiváděné do procesu a míra recirkulace digestátu v rámci fermentace v BPS [15]. Obsah fosforu se uvádí jako obsah celkového fosforu nebo fosfátových ekvivalentů. Fermentační proces však nemá vliv na podíl fosfátů v digestátu – množství fosforu ve FZ je závislé na jeho obsahu ve vstupních surovinách [16].

Přítomnost nečistot a kontaminantů v digestátu je závislá na jejich hojnosti v původním substrátu. Biologické kontaminanty (patogeny, semena plevelů) mohou být během

procesu fermentace degradovány. Míra jejich degradace závisí na teplotě a době zdržení materiálu ve fermentorech. Při teplotě nad 52 °C a zdržení ve fermentoru minimálně po dobu jedné hodiny dochází k odstranění nejrizikovějších plevelů a patogenů [15]. Nicméně, fyzické nečistoty (kusy inertních materiálů, větší kusy rozložitelných materiálů) a chemické kontaminanty (těžké kovy Fe, Ni, Co, Mo, Se, perzistentní organické látky⁶) jsou fermentačním procesem nedotčeny, přechází do digestátu, mají negativní dopad na jeho kvalitu a omezují vhodnost aplikace digestátu na zemědělskou půdu [12]. Výběr vhodných substrátů, případně jejich předúprava, má tedy značný vliv na kvalitu výsledného digestátu (tabulka 4). Na vlastnosti digestátu mají vliv také procesní podmínky. Konkrétní dopady jsou shrnuty v tabulce 5.

| Charakteristika substrátu | Vliv na složení digestátu |
|---------------------------------------|---|
| <i>Organické odpady</i> | - nízký obsah sušiny - nízké procento zastoupení organických látek v sušině |
| <i>Vysoký obsah jatečního odpadu</i> | - vysoká koncentrace dusíku - vysoké procento zastoupení amoniaku v celkovém obsahu dusíku |
| <i>Vysoký obsah statkových hnojiv</i> | - nízký obsah sušiny - značná koncentrace dusíku |
| <i>Energetické plodiny</i> | - vysoký obsah sušiny - vysoké procento zastoupení organických látek v sušině |

Tabulka 4: Vliv vstupního substrátu na složení digestátu [15]

| Charakteristika procesu | Vliv na složení digestátu |
|--|--|
| <i>Velké množství čisté vody</i> | - více vyprodukovaného digestátu - nízká koncentrace solí/amoniaku - nízký obsah sušiny |
| <i>Velký množství recyklované kapaliny⁷</i> | - méně vyprodukovaného digestátu - vysoká koncentrace solí/amoniaku - zvýšený obsah sušiny |
| <i>Krátká doba zdržení</i> | - vysoká koncentrace těkavých mastných kyselin - vysoké procento zastoupení organických látek v sušině - nízké procento zastoupení amoniaku v celkovém obsahu dusíku |

Tabulka 5: Vliv průběhu procesu fermentace na složení digestátu [15]

⁶ Perzistentní organické látky (angl. Persistent Organic Pollutants, POPs) jsou látky, které dlouhodobě setrvávají v životním prostředí. Jedná se např. o různé dioxiny, aldrin, DDT či polychlorované bifenylly [40].

⁷ Velké množství recyklované kapaliny znamená opětovné využití digestátu (či jeho kapalně frakce) jako procesní vody.

2.4.2 Digestát jako hnojivo

Aplikaci digestátu na zemědělskou půdu lze považovat za nejvýhodnější způsob jeho využití. Tímto způsobem se používá fermentační zbytek z BPS, kde vstupní suroviny tvoří statková hnojiva a rostlinné materiály (kukuřičná siláž, obilniny, sláma všech obilovin a olejnin, bramborová nať atd.). Možnosti použití digestátu jsou ovlivněny zejména jeho výslednou kvalitou. Zemědělskou půdu lze hnojit prostým fermentačním zbytkem či jeho separovanými složkami [12].

Povoluje-li to legislativa, většina vyprodukovaného digestátu se aplikuje na zemědělské půdě jako hnojivo. K přednostem tohoto hnojiva se řadí: *zmenšení žíravého účinku kejdy, zlepšení tekutosti kejdy, zmenšení zatížení skleníkovými plyny, zmenšení zatížení pačem, zlepšení odolnosti rostlin, zmenšení vyplavování dusíku, zabránění ztrátám na živinách, omezení klíčivosti semen plevelů a hygienizace kejdy* [17].

Digestát je slabé minerální hnojivo, nelze ho označovat za čistě organické hnojivo.⁸ FZ představuje stabilní, spíše hůře rozložitelnou hmotu, neboť labilnější frakce surovin spotřebovala anaerobní digesce (případně v předcházejícím kroku nejlabilnější frakce organické hmoty využila zvířata). Stabilita organické hmoty digestátu se zvyšuje s kvalitou provozu BPS (vyšší výtěžek bioplynu má za následek hlubší degradaci organické hmoty). Digestát je tedy spíše hnojivem minerálním než organickým a jako organické hnojivo je méně jakostní než výchozí suroviny. Ke hnojení je lepší využít kapalnou fázi digestátu [18].

Kvalitní digestát představuje hnojivo s obsahem organických látek a minerálních živin, které zpravidla nezapáchá nebo vykazuje jen malou míru zápachu. Minimálního zápachu je dosaženo vhodnou skladbou vstupních surovin a dostatečnou procesní dobou ve fermentoru. Zvýšení hnojivého účinku digestátu a snížení emisí při jeho zpracování lze zajistit [12]:

- Použitím zakryté uskladňovací nádrže.
- Vléváním FZ do skladovacích jímek pod hladinu tekutiny.
- Nerozrušováním přirozené plovoucí vrstvy ve skladovacích nádržích.
- Využíváním hadicových aplikátorů (obrázek 4).

Četnost hojení digestátem a jeho množství je podobné jako při hnojení kejdou. Závisí na obsahu živin ve FZ a potřebách pěstovaných rostlin. Množství použitého digestátu vychází z těchto pravidel [12]:

- Pěstitelské podmínky ovlivňující přístup živin (předplodiny, zpracování půdy, závlaha).
- Potřeba živin porostu pro předpokládaný výnos a jeho kvalitu.
- Půdní reakce (pH), poměr důležitých kationtů (Ca, K, Mg) a množství půdní organické hmoty.

⁸ Organické hnojivo musí být snadno mikrobiálně rozložitelné, aby tím uvolnilo minerální živiny a energii potřebnou pro půdní mikroorganismy [18].



Obrázek 4: Hadicový aplikátor [12]

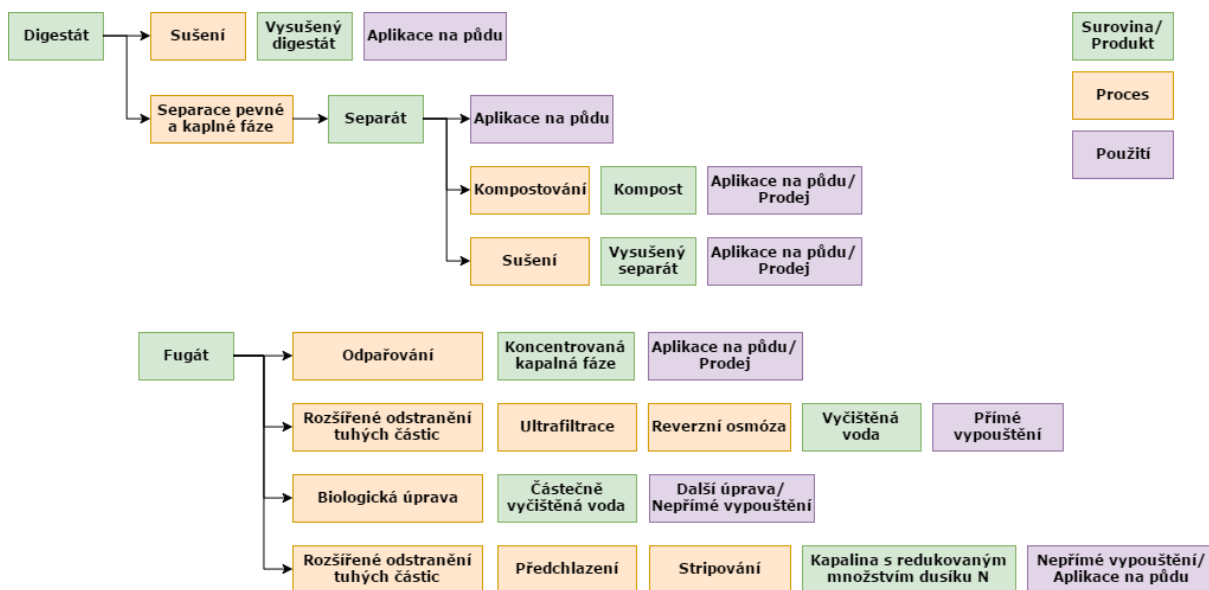
Pozitivní účinky digestátu na pěstování zemědělských plodin jsou potvrzeny nejen zkušenostmi zemědělců, ale i odbornými výzkumy a zkouškami⁹. Digestát tak představuje úspornou alternativu k minerálním hnojivům. Ovšem nakládání s digestátem, podobně jako s jinými hnojivy, podléhá mnoha legislativním a environmentálním omezením, která musí být dodržována dle platných zákonů, nařízení či vyhlášek České republiky a Evropské unie.

⁹ Např. *Přesný polní pokus* provedený Ústředním kontrolním a zkušebním ústavem zemědělským porovnal kvalitu digestátu jako organického hnojiva s ostatními hnojivy. Výsledek tohoto pokusu stvrdil digestát jako vhodnou alternativu k ostatním hnojivům [39].

3 Zpracování digestátu

Cílem zpracování a úpravy digestátu je získání produktu s vyšším obsahem (koncentrací) živin než v nezpracovaném digestátu, oddělení živin v minerální podobě nebo vytvoření dalšího produktu vhodného k obnovení látek a živin v přírodě. Neupravený digestát je poměrně zředěný s ohledem na obsah živin. Podíl vody v surovém FZ je více než 90 % [19]. To přináší zvýšené náklady na dopravu při jeho aplikaci na zemědělské půdě a také při skladování digestátu. Toto jsou některé důvody hovořící pro úpravu digestátu před jeho samotným využitím. Dalšími mohou být environmentální a legislativní omezení. Z legislativních důvodů nelze všechen digestát uplatnit jako hnojivo na půdu v surové podobě [15]. Dochází tak k přebytku fermentačního zbytku a např. v Německu je nyní problém najít odbyt pro digestát (takovýto vývoj lze očekávat i v dalších zemích, vč. ČR) [20]. Zpracování digestátu také přispívá k efektivnímu řízení zdrojů – digestát představuje udržitelný zdroj fosforu¹⁰ a draslíku. Surový digestát, obsahující značné množství vody, není vhodné aplikovat na pozemky nacházející se ve velmi deštivých oblastech a vlhkém podnebí nebo v oblastech citlivých z hydrologického hlediska [15].

Existuje řada technologií pro zpracování fermentačního zbytku z BPS, které lze navzájem vhodně kombinovat. Moderní způsob zpracování digestátu spočívá ve využití jeho maximálního potenciálu: recyklace všech nutrientů v něm obsažených (N, P, K), jejich aplikace jako hnojiva a použití oddělené vodné složky k zavlažování nebo k ředění obsahu fermentoru [14]. Obrázek 5 znázorňuje možnosti zpracování digestátu.



Obrázek 5: Přehled možností zpracování FZ [15]

Z obrázku 5 je patrné poměrně široké rozmezí technologií vhodných k úpravě FZ. Nejhojněji bývá využívána separace pevné (separát) a kapalně (fugát) frakce [21]. K tomu se v závislosti na konzistenci digestátu nejčastěji používají šnekové lisy nebo odstředivky [15]. Poté následuje úprava kapalně a pevně části odděleně. Mezi technologie pro další

¹⁰ Přirozené zásoby fosfátů a draslíku se nachází jen na několika místech světa. Tyto látky se získávají důlní činností. Odhaduje se, že snadno dostupné zdroje fosforu budou vyčerpány do konce tohoto století [42]. Nicméně poptávka po těchto živinách se plynule zvyšuje, čímž se prohlubuje rozdíl mezi dostupností živin a poptávkou po nich. Důsledkem je růst ceny látek [41].

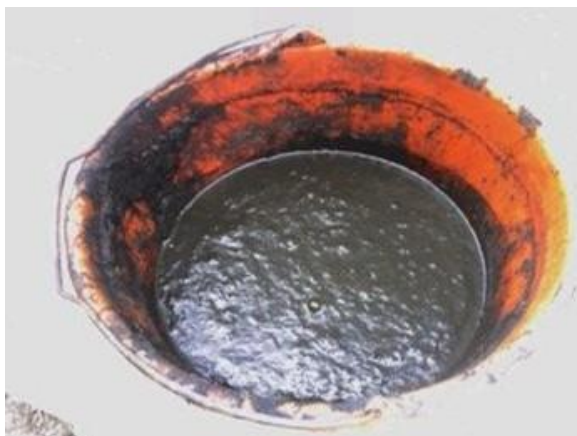
zpracování kapalně frakce digestátu se řadí biologické čištění, odpařování, stripování amoniaku, solární sušení atd. [15]. Separát může být použit v zemědělství, zahradnictví a k úpravě krajiny, kdy se využívá podobným způsobem jako kompost [21]. Pevnou frakci je také možno sušit a vyrábět z ní tuhá alternativní paliva, nebo může být karbonizována [14]. Jednotlivé způsoby úpravy FZ budou představeny v následující kapitole.

3.1 SEPARACE DIGESTÁTU

Prvním krokem zpracování FZ je zpravidla separace pevné a kapalně fáze. Surový digestát obsahuje sušinu v rozmezí 3-13 % (v případě mokré anaerobní digesce¹¹). Separacími procesy lze fermentační zbytek rozdělit na separát (obrázek 6), který obsahuje většinu pevných látek a podíl sušiny je vyšší než 13 %, a na fugát – tekutou frakci (obrázek 7), jenž má obsah sušiny do 3 % [14]. Separát lze přímo využívat v zemědělství s výhodou podstatně nižších nákladů na dopravu vzhledem ke sníženému obsahu vody. Oddělená tuhá frakce vyžaduje nižší nároky na uskladnění. Separát může být, vedle aplikace na zemědělskou půdu, kompostován nebo sušen. Další možností zpracování tuhé frakce je výroba pelet pro vytápění. Nicméně vysoký obsah dusíku v palivu a s tím související zvýšený podíl emisí NOx při jeho spalování představují jisté omezení použití této varianty [15].



Obrázek 6: Tuhá frakce – separát [22]



Obrázek 7: Tekutá frakce – fugát [23]

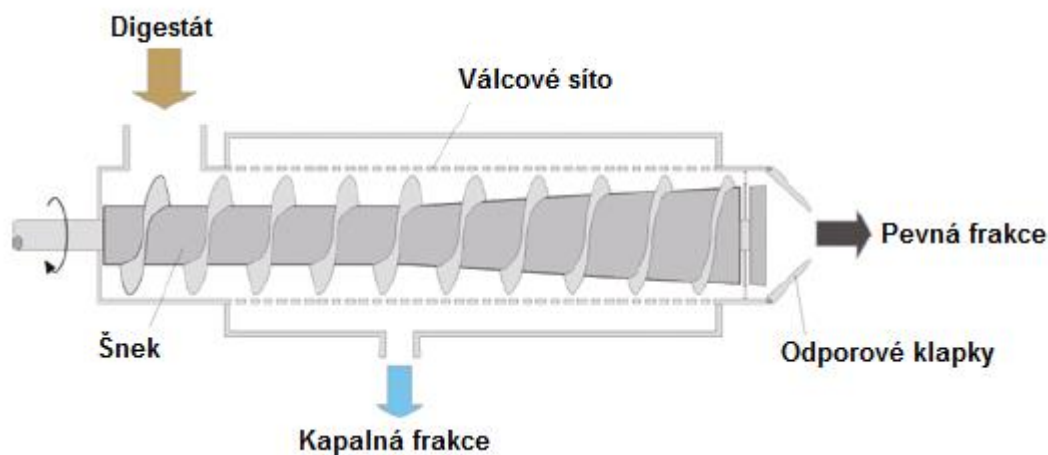
¹¹ Mokrá fermentace představuje nejrozšířenější technologii anaerobní fermentace ve většině zemí EU, vč. České republiky [21].

Při separaci je cílem oddělit kapalnou frakci od pevné. Složení separované kapaliny je rozdílné pro různé způsoby dělení digestátu a také jeho původní složení. Obsah sušiny v pevné frakci může být považován za ukazatele výkonu separace [16]. Část kapalně složky je možné recyklovat v procesu BPS – naředění vstupních surovin. Zbývající fugát může být přímo aplikován na zemědělskou půdu nebo dále zpracováván s cílem zvýšení koncentrace hnojivých látek a redukce objemu fugátu nebo jeho čištění [15].

Nyní budou představeny některé technologie využívané k separaci FZ.

3.1.1 Šnekový lis

Šnekový lis se často používá ke zpracování digestátu s vysokým obsahem částic vláknitého charakteru. Princip separace touto technologií je znázorněn na obrázku 8. Šnek stlačuje materiál a přes válcové síto prochází kapalná fáze. S rostoucím průměrem šneku se zvyšuje tlak na separovaný digestát, což má za následek zvýšení množství odloučeného fugátu. Tuhá frakce vystupuje na konci lisu. Stupeň separace může být ovlivněn velikostí ok síta – menší pevné částice odchází společně s kapalnou fází [24].



Obrázek 8: Šnekový lis [15]

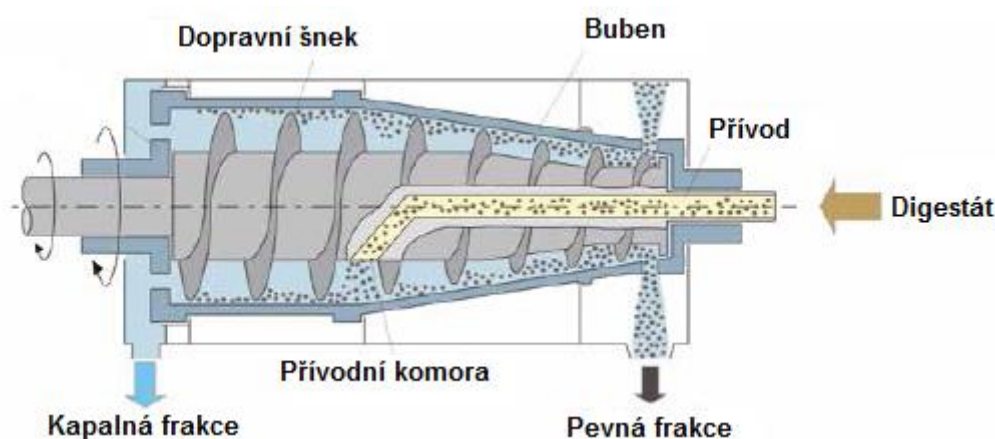
Šnekovým lisem nelze z digestátu oddělit drobné kalové částice (na rozdíl od dekan-tační odstředivky). Výhodami tohoto separátoru jsou nižší investiční náklady a nižší spotřeba energie (0,4 až 0,5 kWh/m³) [15]. Tabulka 6 ukazuje vliv separace šnekovým lisem na složení jednotlivých frakcí.

| | Sušina | N _{tot.} | NH ₄ ⁺ -N | P ₂ O ₅ | K ₂ O |
|-------------------|--------|-------------------|---------------------------------|-------------------------------|------------------|
| | [%] | [g/kg] | [g/kg] | [g/kg] | [g/kg] |
| Digestát (průměr) | 6,5 | 5,1 | 3,2 | 2,3 | 5,5 |
| Pevná frakce | 24,3 | 5,8 | 2,7 | 5,0 | 5,8 |
| Kapalná frakce | 5,7 | 4,9 | 3,0 | 2,3 | 6,2 |

Tabulka 6: Složení pevné a kapalně frakce po separaci šnekovým lisem [25]

3.1.2 Dekantační odstředivka

Dekantační odstředivky jsou často používány při zpracování digestátu – využívají se k separaci malých částic a koloidů od kapalné fáze. Tímto způsobem může být také společně s pevnou fází oddělena značná část fosforu obsaženého v digestátu. Na obrázku 9 je znázorněno schéma dekantální odstředivky. Digestát je do odstředivky přiváděn jejím středem. Vlivem odstředivé síly dochází k oddělování pevných částic. Výkon odstředivky závisí na velikosti a tvaru částic, rozdílu hustoty částic a kapaliny a na viskozitě média. Oddělené částice se shromažďují na válcových stěnách odstředivky a pomocí šneku jsou stlačovány a dopravovány směrem k výstupu. Na opačné straně zařízení se odvádí upravená kapalina [15].



Obrázek 9: Dekantační odstředivka [15]

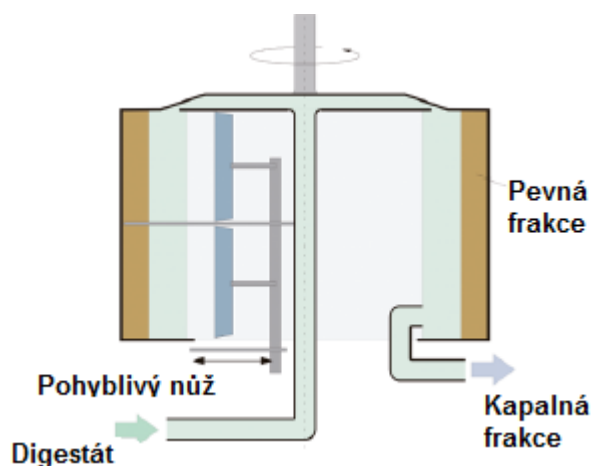
Spotřeba energie tohoto zařízení je ve srovnání s jinými separačními technologiemi poměrně vysoká (3-5 kWh/m³) [15]. Následující tabulka 7 shrnuje účinky dekantální odstředivky na složení jednotlivých frakcí.

| | Sušina | N _{tot} | NH ₄ ⁺ -N | N _{ORG} ¹² | P _{tot} | S _{tot} |
|-------------------|--------|------------------|---------------------------------|--------------------------------|------------------|------------------|
| | [%] | [g/kg] | [g/kg] | [g/kg] | [g/kg] | [g/kg] |
| Digestát (průměr) | 4,85 | 4,08 | 2,87 | 1,21 | 0,94 | 0,42 |
| Pevná frakce | 27,66 | 8,15 | 4,50 | 3,65 | 6,52 | 1,56 |
| Kapalná frakce | 2,31 | 3,49 | 2,63 | 0,86 | 0,31 | 0,29 |

Tabulka 7: Parametry dekantální odstředivky [26]

Existuje také odstředivka s nekontinuálním provozem (obrázek 10), která pracuje v určitých cyklech. Během těchto cyklů je kontinuálně přiváděn digestát a rovněž kapalná frakce opouští odstředivku kontinuálně. Pevná frakce je z odstředivky odstraněna na konci každého cyklu. Energetická náročnost a účinnost separace této metody je srovnatelná s dekantální odstředivkou, nicméně vsázkový provoz představuje vyšší riziko selhání procesu. Diskontinuální odstředivky nejsou v praxi příliš rozšířeny [15].

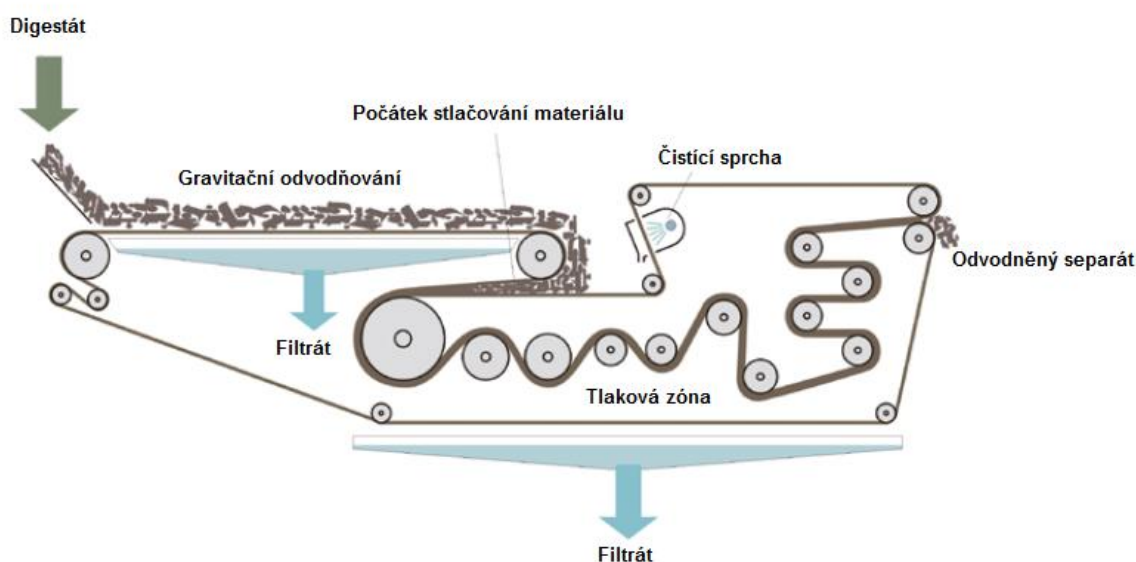
¹² Hodnoty organického dusíku N_{ORG} nebyly přímo měřeny, ale byly dopočítány jako rozdíl mezi množstvím celkového dusíku N_{tot} a amonných iontů NH₄⁺-N [26].



Obrázek 10: Diskontinuální odstředivka [15]

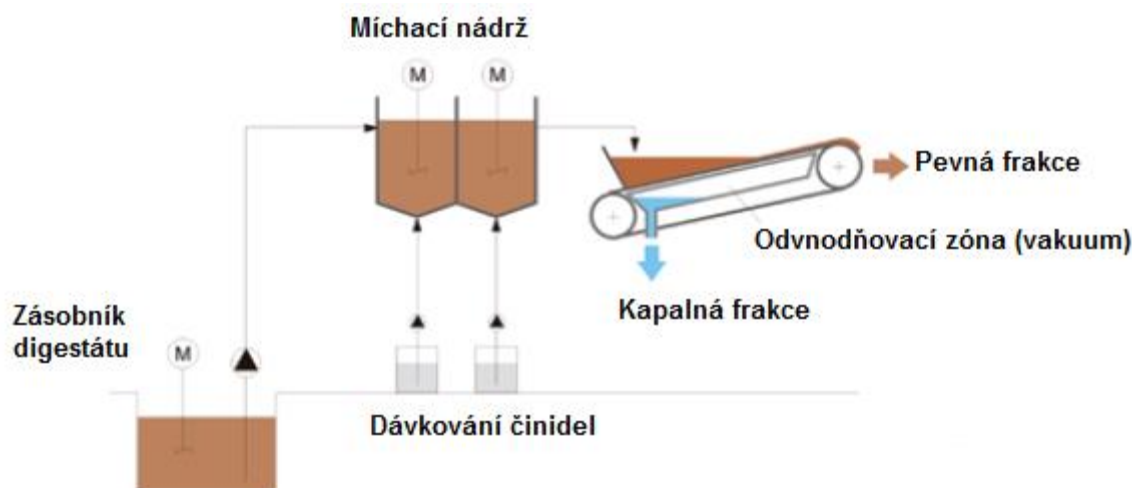
3.1.3 Pásové separátory

Existují dva typy pásových separátorů – tlakové pásové separátory (filtrační lisy) a vakuové pásové separátory. Tlakový separátor je znázorněn na obrázku 11. Digestát je zde kontinuálně přiváděn na filtrační pás. V první fázi dochází k oddělení kapalně fáze působením gravitace – část kapaliny prochází přes filtrační pás, pevné částice jsou na pásu zachyceny a pokračují dále. V dalším kroku je materiál stlačován mezi dvěma filtračními pásy, čímž dochází k dalšímu odvodnění filtračního koláče. Na závěr je odvodněný materiál z pásu odstraněn mechanickým zařízením a filtrační pás je osprchován zbaven nečistot [15].



Obrázek 11: Tlakový pásový separátor [15]

Princip odvodnění digestátu pomocí vakuového pásového separátoru zobrazuje obrázek 12. Upravený digestát je ze zásobníku dávkován na filtrační pás, přes který je vodní frakce nasávána (působení podtlaku) a odváděna mimo zařízení. Na konci pásu je odebírán separát [15].



Obrázek 12: Vakuový pásový separátor [15]

Pro lepší zpracování FZ na pásových filtrech se do digestátu přidávají vysrážecí a flokulační činidla. Účinnost separace je dále ovlivněna, vedle množství a typu těchto činidel, vlastnostmi digestátu a velikostí ok filtračního pásu. K výhodám této technologie dělení digestátu se řadí vyšší účinnost separace ve srovnání se šnekovým lisem a nižší energetická náročnost (1,5–2 kW/h) oproti dekantací odstředivce. Na druhou stranu tento způsob separace vyžaduje vysoké množství přídatného činidla, jenž proces prodražuje [15].

Po hlavní separaci tuhých částic od tekutého fugátu mohou následovat přídatné separační procesy pro zlepšení kvality tekuté frakce – odstranění jemnějších částic, nadbytečného fosforu apod. Mezi přídatné separační technologie patří např. srážení/flokulace, flotace nebo použití sít a filtrů [15]. Využití těchto technologií závisí na celkové koncepci zpracování digestátu.

3.2 ZPRACOVÁNÍ PEVNÉ FRAKCE DIGESTÁTU

Obsah sušiny v separátu se pohybuje v rozmezí od 20 do 30 %. Oddělená pevná frakce je již částečně stabilizována, což usnadňuje její skladování a umožňuje přímou aplikaci separátu jako hnojiva či půdního přídatku. Nicméně tato frakce stále obsahuje určité množství biologicky rozložitelného materiálu, jehož případný rozklad vyvolá emise zápachu. Je-li žádáno získat stabilní a prodejný hnojící produkt, je zapotřebí dalšího zpracování separátu, např. jeho kompostování či sušení [15].

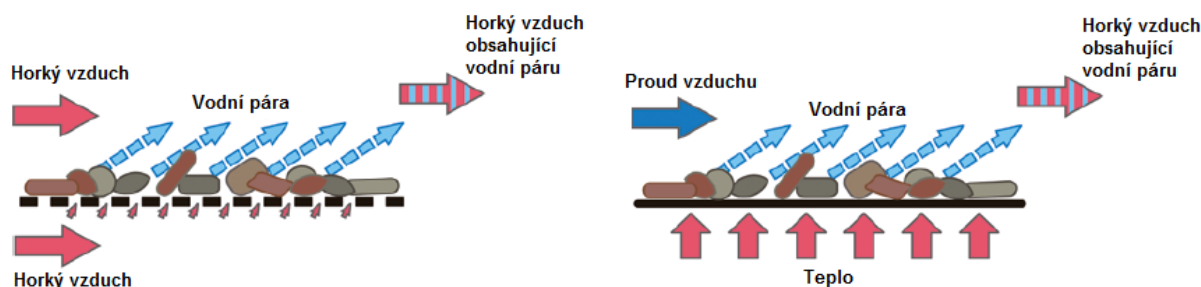
3.2.1 Kompostování

Během procesu kompostování dochází pomocí mikroorganismů k aerobnímu rozkladu a přeměně organické hmoty na kompost. Kompost je stabilizovaný organický materiál obsahující humusotvorné látky a díky pozvolnému uvolňování živin představuje ideální bio hnojivo a je také vhodný k obohacení či obnovení půdy. Během kompostování dochází k uložení dusíku do formy dusičnanů, čímž se zabrání jeho ztrátám. Určité množství dusíku se však může uvolnit ve formě plynného amoniaku [27]. Vzhledem k vlhkosti separátu a jeho částečné degradaci vlivem fermentačního procesu je nutné doplnit proces

kompostování o přídatný materiál, např. dřevní štěpka. Přídatný materiál přispívá ke stabilizaci tvorby kompostu a k přísunu vzduchu do procesu (aerobní podmínky) [15]. Zvláštním druhem kompostování je tzv. vermikompostování¹³, kdy se využívá účinku žížal [28].

3.2.2 Sušení digestátu

Proces sušení pevného podílu FZ se zaměřuje na stabilizaci produktu, snížení jeho celkové hmotnosti a zvýšení koncentrace živin. K sušení lze využít přebytečné teplo z kogenerační jednotky BPS. Teplo potřebné pro sušení materiálu je přímo úměrné obsahu vlhkosti v surovině [27]. Sušit lze, mimo separované tuhé frakce, také původní digestát bez předchozí úpravy. Častěji se však tento druh zpracování materiálu aplikuje na separát [15]. Obrázek 13 znázorňuje dva principy procesu sušení: vlevo je sušení konvekční, vpravo sušení přímým kontaktem (kondukcí).



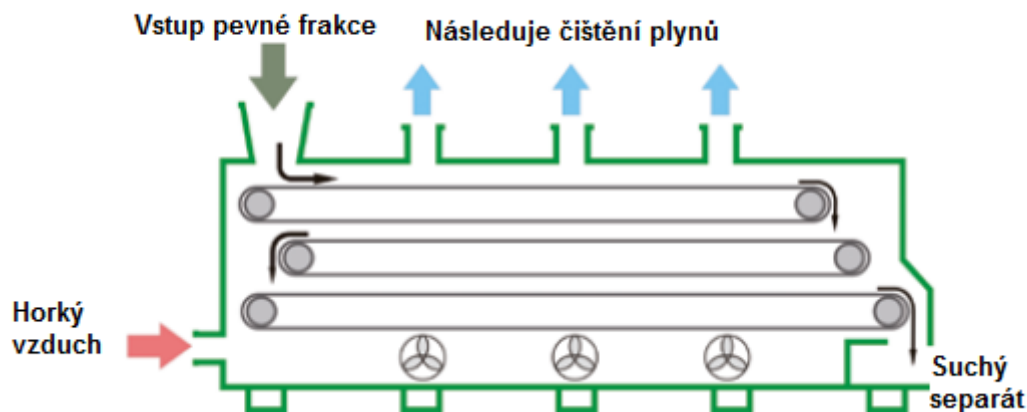
Obrázek 13: Principy sušení FZ –konvekční (vlevo), přímým kontaktem (vpravo) [15]

Existují různé druhy sušáren, které mohou být použity k sušení surového digestátu nebo pevné frakce, např. pásová sušička, bubnová sušička, feed-and-turn sušička, fluidní sušička. Pro sušení digestátu se běžně používá pásová sušárna (obrázek 14) [15]. Pasové sušárny pracují s teplotou 80–120 °C, využívají zbytkového tepla z kogenerace. Podíl sušiny v usušeném separátu je vhodné udržovat okolo 88 % [14]. Alternativou zmíněných sušiček může být systém solárního sušení s podporou přebytečného tepla z kogenerační jednotky [15], [27].

Výfukové plyny sušiček digestátu obsahují prachové částice, amoniak a další těkavé látky (těkavé kyseliny). Za účelem snížení emisí těchto látek je třeba vybavit systém sušení FZ prachovými filtry, mokrou vypírkou či jinými jednotkami k čištění plynů [15].

Sušený digestát může být uváděn na trh ve své původní, sypké podobě nebo ve formě granul, čímž se zjednoduší manipulace, skladovatelnost a přeprava materiálu [27]. Tyto produkty se dále nabízejí jako hnojivo pro zahradnictví, do pěstitelských školek nebo do speciálních pěstitelských systémů (pěstování hub) [15].

¹³ Vermikompostování představuje degradaci bioodpadů pomocí žížal za účelem získání produktu pro hnojení, obnovení půdní kultury apod. Výzkumné práce společnosti STKO, spol. s r.o. potvrdily vhodnost použití separátu pro tvorbu vermikompostu [28].



Obrázek 14: Pásová sušárna [15]

Usušený separát lze rovněž využít pro výrobu tuhých alternativních paliv. V kombinaci s dalšími druhy biomasy (např. dřevní odpad z lesní těžby, odpady z dřevařských a nábytkářských provozů, seno, sláma aj.) se materiál lisuje do briket (obrázek 15), které je možné spalovat. Vhodná volba přídatného materiálu vede k optimalizaci výhřevnosti paliva a jeho mechanicko-fyzikálních vlastností [29].



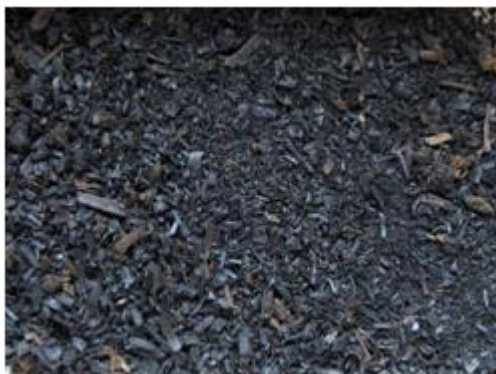
Obrázek 15: Brikety ze separátu a různých druhů biomasy [29]

3.2.3 Karbonizace

Další úpravou separátu je jeho termochemická přeměna (karbonizace) na biouhel¹⁴ (obrázek 16). Karbonizace představuje chemickou reakci (anaerobní, teplota mezi 300 až 500 °C), během které vznikají pyrolýzní plyny a voda, dehty a tuhý zbytek – biouhel. Výzkumy společnosti BIOUHEL.CZ s.r.o. vyhodnotily biouhel získaný z FZ jako nej kvalitnější – zuhelněný separát z digestátu disponuje vysokým obsahem uhlíku a velkým specifickým povrchem. Pro karbonizaci FZ lze využít odpadní teplo z kombinované výroby

¹⁴ Biouhel je obdobou dřevěného uhlí, ovšem vyrobený ze zbytkové biomasy. Ke vzniku biouhlu dochází vlivem dostatečně vysoké teploty za minimálního/žádného přístupu vzduchu. Chemicky stabilní uhlík, který nepodléhá dalšímu rozkladu ani oxidaci, představuje základní složku zuhelněné biomasy [30].

elektrické a tepelné energie v BPS. Kapalnou frakci digestátu je možné filtrovat přes biouhel, v němž se zachytí živiny, a fugát se dočistí na žádanou kvalitu. Biouhel přispívá ke zlepšení kvality zemědělské půdy, zvýšení úrodnosti a retenční kapacity a také zamezuje vyplavování živin a snižuje emise skleníkových plynů [30].



Obrázek 16: Biouhel ze separátu [30]

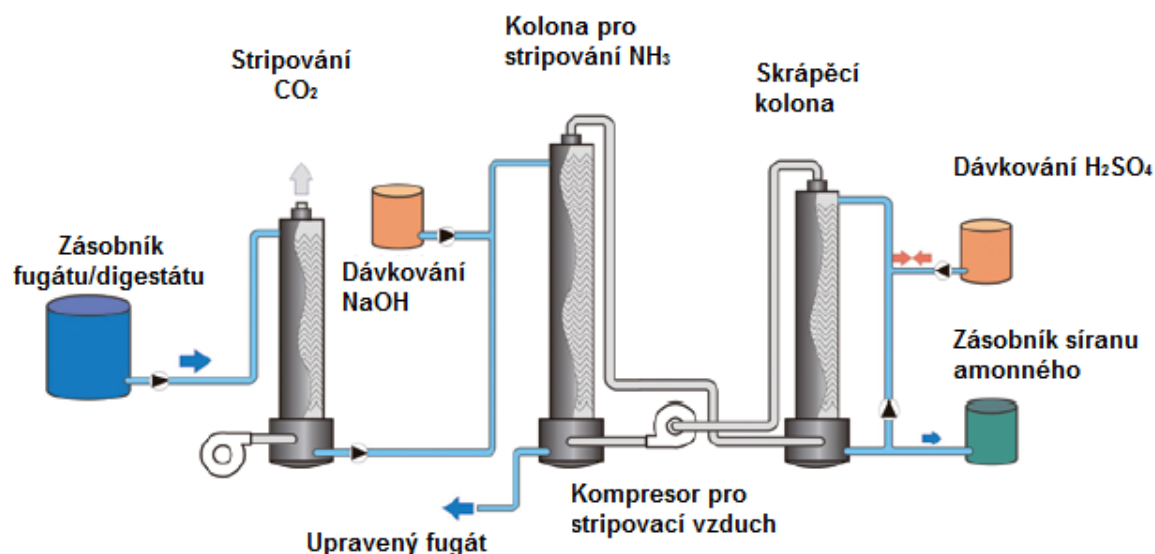
3.3 ZPRACOVÁNÍ KAPALNÉ FRAKCE DIGESTÁTU

Navzdory separaci tuhé frakce od kapalné, fugát stále obsahuje značné množství nerozpuštěných látek a živiny. Přesná koncentrace těchto látek v kapalině závisí na složení vstupního substrátu, separační technologii a přídatné technologii čištění fugátu (flokulace, flotace atd.). Oddělený fugát ve většině případů nelze vypouštět přímo do vodních recipientů (nevyhovuje environmentálním požadavkům). Část kapalné frakce může být využita v rámci BPS během drcení a promíchání výchozího substrátu před jeho vstupem do fermentorů. Množství takto použitelného fugátu závisí na vlhkosti substrátu a také na koncentraci amonného dusíku a solí v procesu (vysoká koncentrace těchto látek vede k inhibici dějů ve fermentoru). Nicméně, doporučuje se alespoň částečně využít kapalnou frakci jako procesní vodu, neboť se sníží náklady na další úpravu fugátu. Je-li součástí areálu BPS také kompostárna, lze kapalnou frakci použít k hydrataci kompostu [15].

3.3.1 Stripování amoniaku

Plynové stripování je proces, při kterém se z kapaliny odstraní těkavé látky pomocí proudu plynu, procházejícího skrz kapalinu [15]. V tomto případě je cílem odstranit z fugátu dusík ve formě amoniaku. Ke zvýšení těkavosti amoniaku ve vodném roztoku přispívá zvýšená teplota a hodnota pH [27]. Pro vyšší teplotu lze využít odpadní teplo z ko-generace a vyšší hodnoty pH dosáhneme přidáním alkálií nebo odstraněním CO_2 [15], [27].

Existují dva hlavní procesy stripování amoniaku – stripování vzduchem a stripování párou [16]. Při stripování vzduchem (obrázek 17) vstupuje ohřátý fugát do stripovací kolony, kde je prvním krokem odstranění CO_2 . V následující stripovací koloně, která obsahuje výplňový materiál pro zvětšení přenosové plochy, dochází k přenosu amoniaku z kapalného fugátu do proudu plynu. Z plynné fáze je amoniak odstraněn ve skrápěcí koloně pomocí kyseliny sírové za vzniku síranu amonného, který je komerčně ceněným hnojivem. Vyčištěný plyn může být opětovně použit ve stripovací koloně [15].



Obrázek 17: Stripování amoniaku vzduchem [14]

Při stripování párou je princip obdobný jako na předchozím obrázku 17 s tím rozdílem, že v technologii není potřeba skrápěcí kolona, neboť amoniak může společně s párou kondenzovat za vzniku amonné vody s koncentrací amoniaku od 25 do 35 % [15].

Ve výplňové stripovací koloně může docházet k ucpání kolony zbytkovými pevnými částicemi vyskytujícími se v kapalně frakci [27]. Proto je nezbytná důkladná separace digestátu před aplikací této technologie a také údržba a čištění aparátů [16]. Velkou výhodou stripování amoniaku je získání čistého dusíkatého hnojiva. Navíc roztok tohoto hnojiva může být použit k obohacení a standardizování dalších produktů úpravy digestátu, což vede ke zvýšení jejich prodejnosti [27].

3.3.2 Vysrážení struvitu

Amonium NH_4^+ a fosfát PO_4^{3-} mohou být z digestátu odstraněny v podobě struvitu (fosforečnan hořečnat-amonný MgNH_4PO_4) během tzv. MAP srážení (magnesium ammonia phosphate) [15]. Struvit (obrázek 18) se získá ve formě krystalů a lze ho použít jako anorganické hnojivo nebo jako surovinu pro výrobu pelet [27].

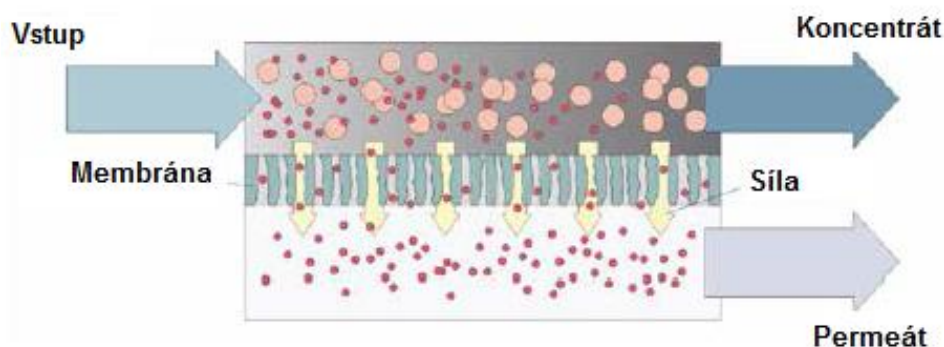


Obrázek 18: Struvit vysrážený ve formě krystalů (vlevo), struvitové pelety (vpravo) [27]

Pro získání optimálního složení struvitu se do fugátu přidává oxid hořečnatý a kyselina fosforečná v takovém množství, aby koncentrace živin ve výsledném produktu byla v poměru $Mg:N:P = 1,3:1:0,9$ [15]. Hodnota pH se oproti původní hodnotě fugátu mírně zvýší na 8,5-9,0. Vysrážení struvitu se obvykle provádí v reaktorech s fluidním ložem [27]. Oddělení struvitu od roztoku se uskutečňuje v odstředivce nebo dochází k sedimentaci struvitových krystalů na dně reaktoru [15]. Získaný struvit je dobré hnojivo s pomalým uvolňováním živin [16]. Nevýhodou této metody je nutná přítomnost velkého množství přídavných chemických látek, což má za následek vysoké provozní náklady [15].

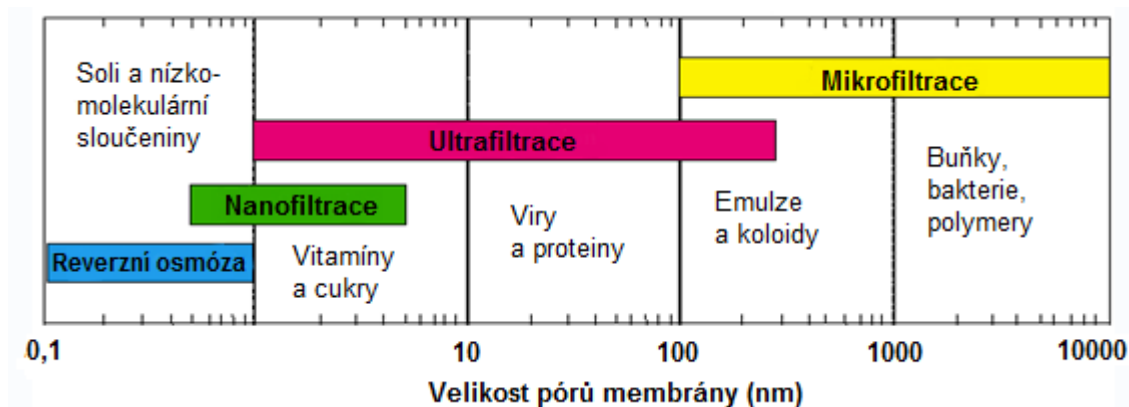
3.3.3 Membránové technologie

Membránový proces (obrázek 19) je fyzikální separační proces, při kterém čistěná kapalná látka prochází přes membránu [15]. Membrána působí jako molekulové síto a umožňuje zachytit některé částice/nečistoty [27]. Částečně vyčištěná voda (permeát) prochází přes membránu [15].



Obrázek 19: Princip membránové separace [15]

Velikost částic, které je membrána schopna zachytit, závisí na velikosti pórů membrány a transmembránového tlaku. Membránové procesy lze na základě tohoto kritéria rozdělit na mikrofiltraci, ultrafiltraci, nanofiltraci a reverzní osmózu [15]. Obrázek 20 nabízí přehled jednotlivých membránových procesů s ohledem na velikost separovaných částic.



Obrázek 20: Přehled membránových procesů [31]

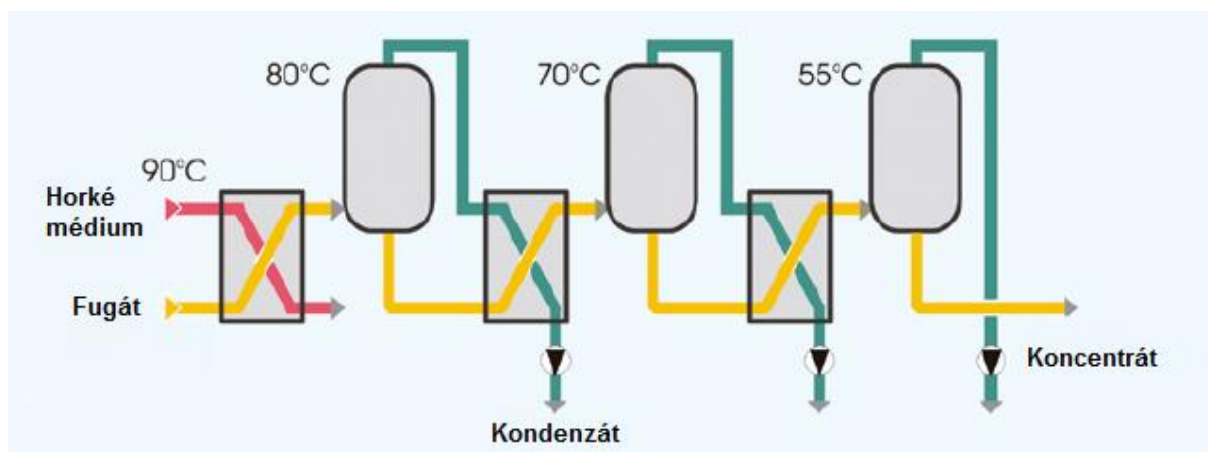
Membránové čištění je složitý proces skládající se z několika kroků. Výchozí surovinou je fugát, který byl oddělen od digestátu ideálně pomocí dekantační odstředivky. Často se také využívá srážecích činidel k vyčerení kapaliny. Následuje mikrofiltrace, ultrafiltrace a nakonec reverzní osmóza [15]. Používají se polymerní membrány nebo častěji keramické, které jsou robustnější a chemicky odolnější [14].

Výsledkem zpracování fugátu membránovou technologií je snížení objemu a zkoncentrování hnojiva. Voda z procesu je většinou přijatelně čistá pro přímé vypouštění [27]. Nevýhodou membránového čištění je omezené množství vyčištěné vody, velký podíl vedlejších produktů a poměrně drahé i energeticky náročné čištění membrány. Filtrace fugátu představuje technologicky a finančně náročnou metodu úpravy FZ [15].

3.3.4 Odpařování

Odpařování digestátu je zajímavé především pro BPS, kde je dostatečně velký přebytek tepla nebo kde lze potřebné teplo získat z jiných zdrojů v okolí BPS. Cílem tohoto procesu je zkoncentrování živin v kapalně frakci, a tedy snížení objemu fugátu [16]. Pro zpracování tekuté frakce FZ jsou používány výparníky s nucenou (použití čerpadla) nebo přirozenou cirkulací. Tyto dva výparníky se používají pro svou relativně robustní konstrukci s ohledem na obsah pevných látek ve fugátu [15].

Po separaci tekuté frakce následuje nejdříve úprava fugátu a posléze samotná evaporizace. Úprava spočívá v odstranění CO_2 a přidání kyseliny sírové, čímž se sníží hodnota pH na typických 4,5 a dojde ke stabilizaci dusíku ve formě $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (po procesu odpařování zůstane prakticky veškerý dusík v koncentrátu) [15], [27]. Po okyselení fugátu přichází na řadu odpařování – 3stupňový systém nízkotlakového odpařování (obrázek 21). Nízkotlakový systém umožňuje dosáhnout varu kapaliny při nižší teplotě [15]. Zkondenzovanou páru lze použít jako procesní vodu v BPS. Některé studie uvádějí, že kondenzát z tohoto procesu je vhodný pro přímé vypouštění do povrchových vod [27]. Nicméně, ve většině případů tomu tak není, neboť kapalina obsahuje vyšší koncentrace amoniaku a těkavých kyselin, než povolují limity. Může však být odváděna do ČOV [15].



Obrázek 21: Vícestupňový odpařovací systém [15]

V případě využití přebytkového tepla z kogenerační jednotky je možné dosáhnout snížení objemu digestátu obvykle o 50 %. Dle zkušeností se tepelná energetická náročnost tohoto procesu pohybuje okolo 300-350 kWh na tunu odpařené vody [15]. Výkonnostní údaje odpařovacího procesu uvádí tabulka 8.

| Fugát | Sušina [%] | Těkavé pevné látky [%] | N _{tot} [mg/kg] | PO ₄ -P [mg/kg] | CHSK [mg/kg] |
|-------------------|---------------|------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------|
| <i>Vstup</i> | 3,1 | 1,7 | 3100 | 300 | 45000 |
| <i>Koncentrát</i> | 10-12 | 7,5-9 | 8000-10000 | 800-1200 | 95000-120000 |
| <i>Kondenzát</i> | 0,05 | 0,05 | 30-50 | 0 | <1000 |

Tabulka 8: Parametry odpařovacího procesu [32]

4 Materiálová a energetická bilance bioplynové stanice

Cílem této diplomové práce je navrhnout integraci vybrané odvodňovací technologie v BPS a také zhodnotit tento návrh, vč. ekonomického hlediska. V rámci následující kapitoly budou porovnány provozy dvou BPS: obecné BPS (OBPS) a BPS s odvodňovací technologií (BPSOT). Hlavním předmětem diplomové práce je zpracování digestátu a z tohoto hlediska se rovněž zmíněné dva druhy BPS liší. OBPS vyprodukovaný digestát žádným způsobem neupravuje a většinu jeho množství aplikuje na zemědělskou půdu jako hnojivo (část digestátu se využívá jako recykl v procesu BPS). Naproti tomu BPSOT vzniklý digestát upravuje za účelem snížení jeho objemu a tím i nákladů na jeho zužitkování. V předkládané práci byla jako první odvodňovací technologií pro úpravu digestátu zvolena separace tuhé a tekuté frakce pomocí šnekového lisu. Oddělený separát není v rámci této BPSOT dále upravován a bude použit např. přímo jako hnojivo, jako příměs hnojivých substrátů či jako materiál pro tvorbu podestýlky dobytka. Naopak získaný fugát bude dále zpracován v odpařovacím systému, jehož cílem je snížení objemu materiálu a zkoncentrování živin. Zahuštěný fugát bude využíván jako hnojivo, kondenzát (zkoncentrovaná pára z odpařovacího procesu) se použije k naředění vstupních surovin nebo bude vypouštěn do okolního recipientu (je předpokládána dostatečná čistota kapaliny pro vypouštění do okolí, čili dovolené složení a koncentrace rizikových látek v kondenzátu).

Materiálová a energetická bilance (MEB) obou BPS budou vycházet ze vstupních surovin, které používá reálná BPS Slavkov u Brna. Vstupními surovinami této stanice jsou kejda skotu a kukuřičná siláž. Celkové množství materiálů a jejich poměr je uveden v tabulce 9. Tato tabulka je na základě literatury [33] doplněna o podíl sušiny v materiálu a o teoretickou výtěžnost bioplynu z těchto substrátů (jedná se o průměrné hodnoty jednotlivých parametrů, dílčí kroky stanovení daných hodnot jsou uvedeny v příloze č. 1).

| Druh materiálu | Množství [t/rok] | Podíl sušiny [%] | Výtěžnost bioplynu [m ³ /t _{org.suš.}] |
|-----------------|---------------------|---------------------|--|
| Kejda skotu | 5000 | 10,0 | 280,0 |
| Kukuřičná siláž | 26000 | 33,0 | 586,1 |

Tabulka 9: Vstupní materiály BPS [33], [34]

Data uvedená v tabulce 9 představují výchozí parametry pro tvorbu materiálové a energetické bilance obou typů BPS. Při volbě kogeneračního zařízení se rovněž vychází z BPS Slavkov u Brna. Tato stanice je vybavena dvěma KJ o celkovém jmenovitém elektrickém výkonu 1400 kW_{el}. Jedná se o KJ společnosti DEUTZ: DEUTZ TCG2016C V12 (600 kW_{el}) a DEUTZ TCG2016C V16 (800 kW_{el}) [34]. Pro účely bilance OBPS i BPSOT budou použity přesně tyto KJ. Základní parametry obou typů kogeneračních jednotek jsou uvedeny v tabulce 10.

Pro úplnou tvorbu MEB bioplynové stanice jsou zapotřebí další parametry umožňující kompletní a řešení bilančních rovnic. Následující seznam shrnuje některé z těchto podmínek, jež budou platné pro oba typy BPS. Tyto parametry, vycházející z odborné literatury, mají jistým způsobem usnadnit tvorbu MEB (především fermentační část BPS, tzn. tvorbu bioplynu). Nicméně, stěžejním cílem této práce je vyjádřit důsledek použití odvodňovací technologie digestátu na chod BPS, který tyto doplňující parametry žádným způsobem neovlivní.

| Parametr | Jednotka | TCG2016C V12 | TCG2016C V16 |
|---|-------------------|--------------|--------------|
| Výkon motoru | kW | 620 | 826 |
| Otáčky | min ⁻¹ | 1800 | 1800 |
| Střední efektivní tlak | bar | 15,7 | 15,7 |
| Teplota spalin | °C | 484 | 488 |
| Průtok spalin | kg/h | 3312 | 4384 |
| Průtok spalovacího vzduchu | kg/h | 3053 | 4041 |
| Teplota spalovacího vzduchu (min./design) | °C | 20/25 | 20/25 |
| Spotřeba paliva | kW | 1452 | 1921 |
| Elektrická účinnost | % | 41,3 | 41,6 |
| Tepelná účinnost | % | 44,4 | 44,0 |
| Celková účinnost | % | 85,7 | 85,6 |
| Elektrický výkon | kW _{el} | 600 | 800 |
| Tepelný výkon | kW | 645 | 845 |

Tabulka 10: Technické parametry KJ [35]

DOPLŇUJÍCÍ VÝCHOZÍ PARAMETRY

- DVP1: Koncentrace sušiny v substrátu je 15 %.¹⁵
- DVP2: Koncentrace sušiny v digestátu je snížena vlivem fermentačního procesu o 64,1 % oproti množství sušiny v původním substrátu.¹⁶
- DVP3: Pro naočkování čerstvého materiálu se využívá recykl digestátu, a to v následujícím poměru: $m_{\text{č.mat.}} : m_{\text{dig.recykl}} = 5 : 1$.¹⁷
- DVP4: Množství získaného bioplynu je rovno teoretické výtěžnosti bioplynu z čerstvých vstupních surovin (tabulka 9).¹⁸

¹⁵ Obsah sušiny v materiálu ve fermentoru BPS by se měl pohybovat v rozmezí od 5 do 15 % [7]. Pro materiálovou bilanci v této diplomové práci je proto podíl sušiny ve výchozím materiálu roven 15 %, neboť hlavní vstupní surovinou je kukuřičná siláž, která obsahuje vyšší množství sušiny.

¹⁶ Fermentačními procesy dojde ke snížení podílu sušiny v digestátu (oproti obsahu sušiny ve výchozím substrátu) o 50 až 80 % [8]. Pro MEB byla zvolena hodnota 64,1 %, která vychází z iteračního výpočtu bilance fermentační části BPS (viz kapitola MB FERMENTAČNÍ ČÁSTI OBPS I).

¹⁷ Uvedený poměr byl zvolen na základě konzultací s vedoucím diplomové práce Ing. Mgr. Markem Vondrou.

¹⁸ Recykl digestátu, který obsahuje určité množství sušiny (a tedy i organických látek, jež se mohou přeměnit na bioplyn), se využívá pouze k naočkování a zředění substrátu (potenciální výtěžnost bioplynu z recyklu digestátu se neuvažuje).

- DVP5: Množství vyčištěného bioplynu (tzn. zbaveného vodní páry a sirovo-
díku), který může vstupovat do KJ, je shodné s teoreticky maximálním
množstvím bioplynu získaného ze vstupních surovin.¹⁹
- DVP6: Veškerý bioplyn je spalován v KJ, kde se jeho energie mění na energii
elektrickou a tepelnou.
- DVP7: Vlastní spotřeba elektrické energie BPS je 6 % z vyrobeného množství,
zbývající část 94 % je distribuována do rozvodné elektrické sítě.²⁰
- DVP8: Podíl tepelné energie použité pro potřebu BPS je 20 %. Zbytek tepla
je mařen do okolí (není-li uvedeno jinak).²¹

Nyní budou detailněji uvedeny MEB obou druhů BPS.

4.1 MEB OBECNÉ BPS

Označení „obecná BPS“ zde znamená zemědělskou bioplynovou stanici, která zpracovává vstupní suroviny za účelem produkce bioplynu a digestátu. Bioplyn spaluje v kogenerační jednotce, digestát dále nijak neupravuje a přímo jej aplikuje na zemědělskou půdu jako hnojivo. Takováto BPS se skládá z několika hlavních jednotek: fermentor, plynojem, sklad digestátu, kogenerační jednotka. Schéma OBPS znázorňuje obrázek 22.

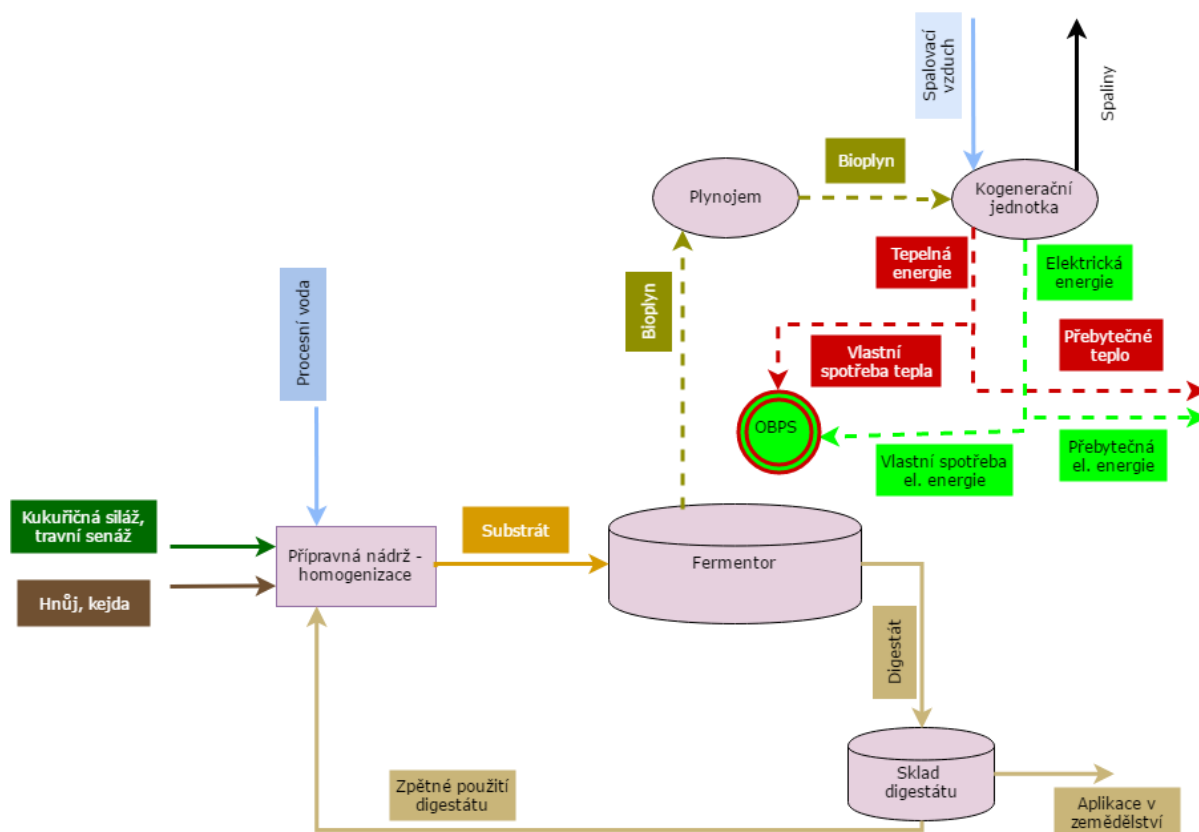
Zjednodušené schéma zobrazuje tok materiálu a energií v BPS. Výchozí suroviny vstupují do BPS přes tzv. přípravnou nádrž (PN). V této nádrži dochází k homogenizaci a předúpravě materiálu. Upravený materiál, substrát, pak vstupuje do fermentoru. Jak je patrné z obrázku 22, do přípravné nádrže může být rovněž přiváděn recykl digestátu a procesní voda. Recykl digestátu, čili jeho zpětné využití v rámci BPS, se uplatňuje z důvodu naočkování nového, čerstvého materiálu fermentačními bakteriemi, což má příznivý vliv na průběh rozkladného procesu ve fermentoru. Příměs digestátu rovněž snižuje podíl sušiny v substrátu, neboť digestát má výrazně nižší obsah sušiny oproti výchozímu materiálu. Je-li třeba dalšího zředění substrátu (za účelem snazší čerpatelnosti materiálu, zlepšení procesních podmínek apod.), využívá se k tomu procesní vody.

Substrát z PN přechází do fermentoru, kde probíhá rozklad organických látek procesem anaerobní digesce. Materiál je ve fermentoru zdržen po dobu několika dní (např. 90 dní [34]) a poté pokračuje dále do uskladňovací nádrže. Většina zfermentovaného materiálu, digestátu, se aplikuje na zemědělskou půdu jako hnojivo. Během fermentační doby je část organického materiálu transformována na bioplyn, který se zachycuje v plynojemu. Nejčastějším způsobem využití získaného bioplynu je jeho spalování v kogenerační jednotce za současné výroby elektřiny a tepla. Elektrická energie je přiváděna do RES, část tepla se využívá k vytápění fermentorů a areálu BPS. Zbytek tepla se buď maří nebo jej lze dále využívat (v případě OBPS je přebytečné teplo mařeno do okolí).

¹⁹ Redukce objemu bioplynu se zanedbává z důvodu neznalosti přesného složení plynu a také malého vlivu čistícího procesu na změnu množství plynu – podíl sirovo-
díku a vodní páry v bioplynu se pohybuje v desetinách až jednotkách procent (tabulka 1).

²⁰ Přesné hodnoty využití vyrobené elektrické energie vychází z reálné BPS Slavkov u Brna. Ta uvádí podíl el. energie pro svou potřebu 6 % a zbývajících 94 % představuje volnou el. energii distribuovanou do sítě [34].

²¹ BPS Slavkov u Brna využívá pro vlastní potřebu (především pro vytápění fermentorů) 20 % vyrobeného tepla [34].



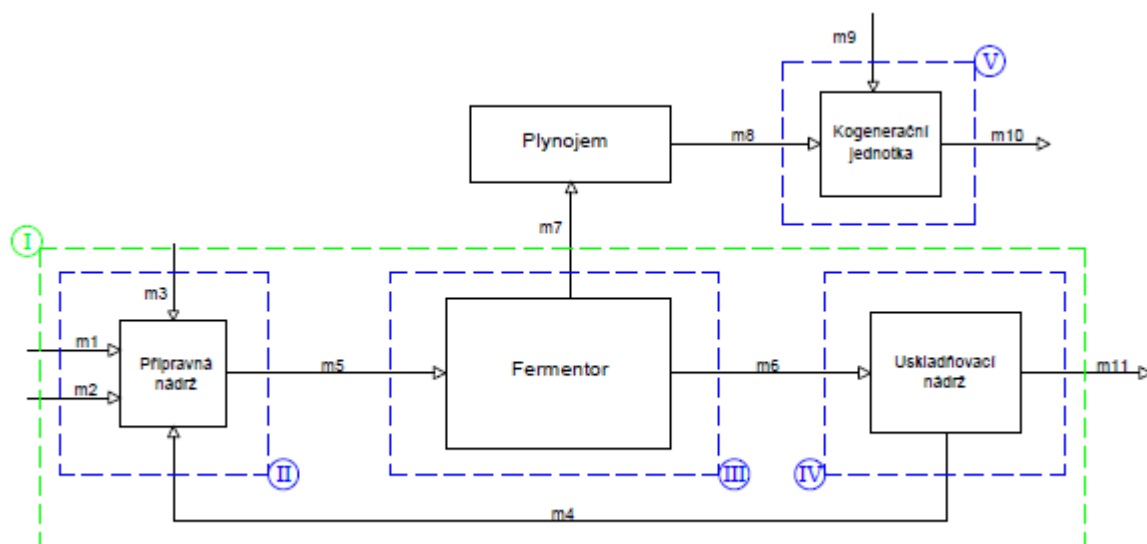
Obrázek 22: Schéma OBPS

4.1.1 Materiálová bilance obecné BPS

V rámci materiálové bilance (MB) OBPS budou definovány vztahy a závislosti jednotlivých proudů. Cílem je stanovení velikosti celkových proudů a také podíl sušiny v jednotlivých frakcích. Obrázek 23 nabízí přehled základních uzlů a proudů obecné BPS (legenda jednotlivých proudů je uvedena níže). Z obrázku vyplývá, že tvorba materiálové bilance OBPS je rozdělena do několika kroků. Nejdříve budou postupně řešeny bilance jednotlivých uzlů (označeny II – V). Následovat bude bilance tzv. fermentační části BPS (označena jako I). Do této skupiny patří tři hlavní uzly: přípravná nádrž, fermentor a uskladňovací nádrž. Jedná se o celkovou bilanci těchto tří zařízení, které jsou uvažovány jako jeden celek. Bilance tohoto celku poslouží jako kontrola dílčích bilancí.

Přehled značení proudů a složek:

| | | | |
|---|------------------|----|--------------------------------|
| 1 | hovězí kejda | 7 | bioplyn |
| 2 | kukuřičná siláž | 8 | upravený bioplyn |
| 3 | procesní voda | 9 | spalovací vzduch |
| 4 | recykl digestátu | 10 | spaliny |
| 5 | substrát | 11 | výstupní digestát (ke hnojení) |
| 6 | digestát | A | sušina |



Obrázek 23: Přehled materiálových proudů v OBPS

Veškeré bilance vychází z rovnosti, jenž je popsána rovnicí (1). Rovnice říká, že množství materiálu na vstupu do dané jednotky je stejné jako množství materiálu vycházejícího z jednotky.

$$m_{vstup} = m_{výstup} \quad (1)$$

kde: m_{vstup} je hmotnostní tok vstupních proudů [kg/h]

$m_{výstup}$ je hmotnostní tok výstupních proudů [kg/h]

Obdobným způsobem je vyjádřena závislost podílu určité složky v jednotlivých proudech. Pro tuto bilanci je stěžejní podíl sušiny (složka A). Rovnice (2) popisuje vztah mezi množstvím sušiny na vstupu a na výstupu.

$$m_{vstup} \cdot x_{vstup}^A = m_{výstup} \cdot x_{výstup}^A \quad (2)$$

kde: m_{vstup} je hmotnostní tok vstupních proudů [kg/h]

x_{vstup}^A je hmotnostní koncentrace složky A ve vstupním proudu [-]

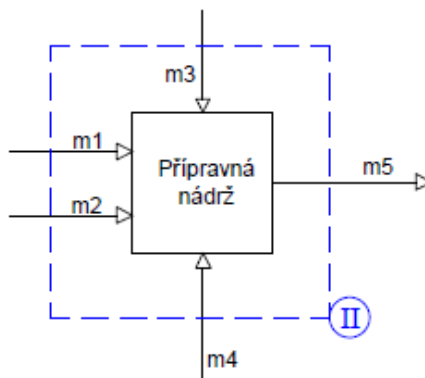
$m_{výstup}$ je hmotnostní tok výstupních proudů [kg/h]

$x_{výstup}^A$ je hmotnostní koncentrace složky A ve výstupním proudu [-]

Nyní budou uvedeny bilance jednotlivých částí (II–V) BPS a také bilance tzv. fermentační části OBPS (I). Kompletní výpočet je uveden na listu *MEB OBPS* v příloze č. 1.

PŘÍPRAVNÁ NÁDRŽ II

Situace v tomto uzlu je znázorněna na obrázku 24. Pro tuto bilanci byly zvoleny dva hlavní vstupní materiály – kukuřičná siláž a kejda skotu (dle BPS Slavkov u Brna). Dále do přípravné nádrže vstupuje recykl digestátu a procesní voda. Výstupem je homogenizovaný substrát, který pokračuje do fermentoru.



Obrázek 24: Materiálová bilance přípravné nádrže

Celkovou materiálovou bilanci této nádrže popisuje rovnice (3). Rovnice (4) vyjadřuje splnění požadavku na koncentraci sušiny ve výsledném substrátu ($x_5^A = 0,15$ dle DVP1).

$$m_1 + m_2 + m_3 + m_4 = m_5 \quad (3)$$

$$\frac{m_1 \cdot x_1^A + m_2 \cdot x_2^A + m_3 \cdot x_3^A + m_4 \cdot x_4^A}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4} = x_5^A \quad (4)$$

Neznámými parametry v těchto rovnicích jsou toky procesní vody m_3 a substrátu m_5 . Množství vstupního materiálu m_1 a m_2 vychází z tabulky 9, tok recyklu digestátu m_4 je dán rovnicí (5), která vychází z doplňující podmínky DVP3.

$$m_4 = (m_1 + m_2) \cdot \frac{1}{5} = 775 \text{ kg/h} \quad (5)$$

Z rovnice (4) lze tedy vyjádřit hmotnostní tok procesní vody m_3 (koncentrace sušiny v procesní vodě $x_{3,A} = 0$):

$$m_3 = \frac{m_1 \cdot (x_1^A - x_5^A) + m_2 \cdot (x_2^A - x_5^A) + m_4 \cdot (x_4^A - x_5^A)}{x_5^A} = 3195 \text{ kg/h} \quad (6)$$

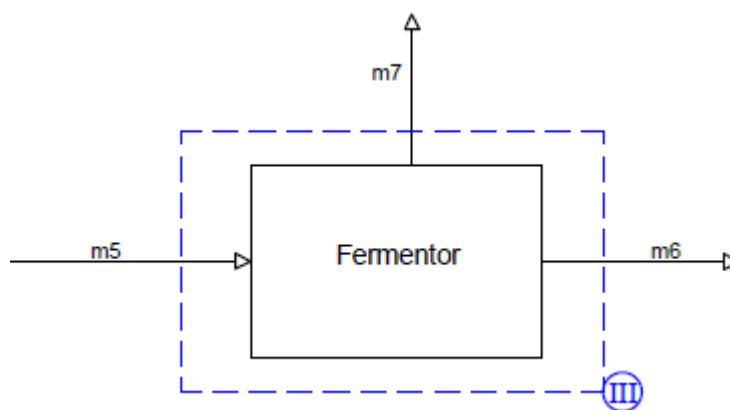
Vyřešením rovnice (6) byl získán potřebný průtok procesní vody pro získání substrátu požadované kvality. Po dosazení vypočtené hodnoty do rovnice (3) lze určit hodinový průtok substrátu m_5 vstupujícího do fermentoru.

$$m_5 = 7845 \text{ kg/h}$$

FERMENTOR III

Do fermentoru vstupuje proud substrátu m_5 a dochází zde ke tvorbě bioplynu m_7 . Druhým výstupem z tohoto uzlu je digestát m_6 (obrázek 25).

Množství získaného bioplynu V_7 je dle DVP4 rovno teoretické výtěžnosti bioplynu z čerstvého vstupního materiálu. Při stanovení toku bioplynu se tedy vychází z podílu organické sušiny v substrátu a teoretické výtěžnosti bioplynu z jednotlivých surovin (tyto parametry byly získány z odborné literatury [33]). Rovnice (7) stanovuje postup výpočtu množství bioplynu:



Obrázek 25: Materiálová bilance fermentoru

$$V_7 = \sum_{i=1}^n m_i \cdot x_i^{A,org.} \cdot v_i^{BP} = \mathbf{618,3 \text{ m}^3/h} \quad (7)$$

- kde: V_7 je množství získaného bioplynu [m^3/h]
 m_i je hmotnostní tok čerstvého materiálu [kg/h]
 $x_i^{A,org.}$ je hmotnostní koncentrace organické sušiny v proudu [-]
 v_i^{BP} je teoretická výtěžnost BP ze vstupního materiálu [m^3/kg]

Tomuto množství bioplynu odpovídá jisté teoretické množství organických látek (m_7), které se rozložily a přeměnily na bioplyn. Hmotnostní tok m_7 tak představuje výstup („zánik“) materiálu z fermentoru v podobě bioplynu a lze jej stanovit na základě rovnice (8):

$$m_7 = V_7 \cdot \rho_{BP} = 742 \text{ kg/h} \quad (8)$$

- kde: ρ_{BP} je průměrná hustota bioplynu [kg/m^3]

$$\rho_{BP} = 1,2 \text{ kg/m}^3 \text{ [36]}$$

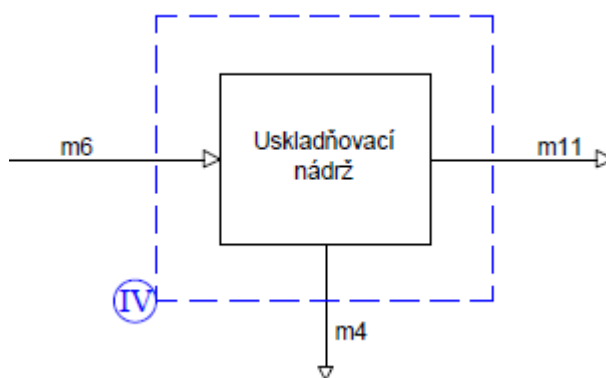
Tok m_7 se vyskytuje v celkové materiálové bilanci fermentoru – rovnice (9), z které lze poté vyjádřit množství získaného digestátu m_6 – rovnice (10).

$$m_5 = m_6 + m_7 \quad (9)$$

$$\mathbf{m_6 = m_5 - m_7 = 7103 \text{ kg/h}} \quad (10)$$

USKLADŇOVACÍ NÁDRŽ IV

Materiálovou bilanci uskladňovací nádrže znázorňuje obrázek 26. V tomto uzlu se v podstatě rozdělí vstupující digestát dle následného použití na recykl digestátu (m_4) a na digestát určený ke hnojení (m_{11}). Z bilanční rovnice (11) lze poté stanovit množství digestátu, který bude využíván pro zemědělské účely – rovnice (12).



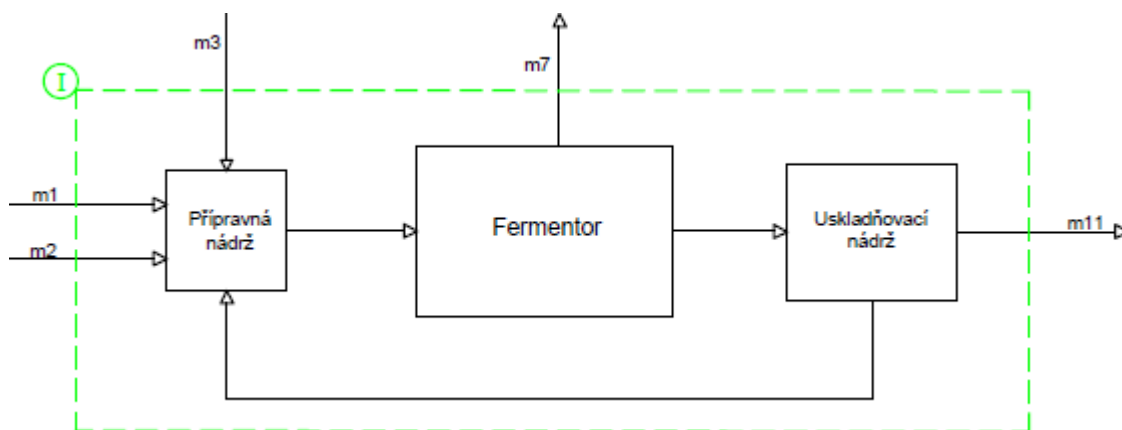
Obrázek 26: Materiálová bilance fermentoru

$$m_6 = m_4 + m_{11} \quad (11)$$

$$m_{11} = m_6 - m_4 = 6328 \text{ kg/h} \quad (12)$$

MB FERMENTAČNÍ ČÁSTI OBPS I

Jak již bylo zmíněno výše, pod pojmem fermentační část BPS se v tomto případě skrývá soubor tří na sebe navazujících jednotek – přípravná nádrž, fermentor a uskladňovací nádrž (obrázek 27). Materiálová bilance této části OBPS slouží k ověření dílčích bilančních výpočtů a i zde by měla platit rovnost mezi vstupy a výstupy. Rovnice (13) vyjadřuje celkovou materiálovou bilanci, rovnice (14) bilanci přes složku A. Také v tomto případě je množství získaného bioplynu nahrazeno hmotnostním tokem představujícím organické látky, jež se rozložily a přeměnily na bioplyn (rovnice (8)).



Obrázek 27 Materiálová bilance fermentační části OBPS

$$m_1 + m_2 + m_3 = m_7 + m_{11} \quad (13)$$

$$m_1 \cdot x_1^A + m_2 \cdot x_2^A + m_3 \cdot x_3^A = m_7 \cdot x_7^A + m_{11} \cdot x_{11}^A \quad (14)$$

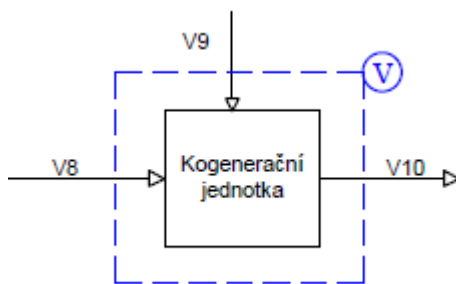
Úpravou těchto rovnic (převedením všech parametrů na levou stranu rovnice) by měla nastat rovnost ve tvaru $0 = 0$. V případě rovnice (13) tomu tak je:

$$m_1 + m_2 + m_3 - m_7 - m_{11} = 0 = 0 \quad [\text{kg/h}]$$

U bilance přes složku A této rovnosti není dosaženo. Přesněji je ve vstupních proudcích více sušiny než ve výstupních. Rozdílné množství sušiny na obou stranách bilančního uzlu, jehož velikost se pohybuje jen v řádu jednotek kg/h, lze zdůvodnit především tím, že bylo využito zjednodušení fermentačního procesu, kdy množství degradovaného materiálu bylo stanoveno na základě teoretické výtěžnosti bioplynu a jeho průměrné hustoty (rovnice (8)). Za účelem odstranění tohoto rozdílu a získání tak rovnovážné bilance OBPS byla v programu Excel použita iterační funkce *Hledání řešení*. Tato funkce upraví hodnotu jednoho ze zvolených parametrů, který vstupuje do bilančních rovnic, čímž bude získána požadovaná hodnota v cílové buňce. V tomto případě bylo cílem dosáhnout nulového rozdílu mezi vstupními a výstupními proudy sušiny v rámci fermentační části BPS. Měněnou buňkou byl parametr DVP2 (snížení podílu sušiny v digestátu vlivem fermentace), jehož hodnota se změnila z původních 65 % na 64,1 %. Nově stanovená hodnota náleží do intervalu, jež uvádí odborná literatura, a je díky ní dosaženo rovnovážné bilance OBPS.

KOGENERAČNÍ JEDNOTKA V

Bioplyn se před vlastním využitím v KJ nejprve zadržuje v plynojem, který je zpravidla umístěn nad fermentory. Rovněž bývá zbaven sirovodíku a vodní páry. Tato úprava však bude vzhledem k neznámému přesnému složení vzniklého bioplynu zanedbána. Množství bioplynu, které je možné použít v KJ, se v rámci této bilance shoduje s teoretickým množstvím BP získaného ze vstupních surovin. V tomto případě budou bilancovány jednotlivé proudy přes objemové průtoky. Situaci v tomto uzlu znázorňuje obrázek 28.



Obrázek 28: Materiálová bilance kogenerační jednotky

Množství bioplynu vstupujícího do KJ (tok V_8) vychází z technických parametrů tohoto zařízení (tabulka 10). Společnost DEUTZ uvádí pro kogenerační jednotku typu TCG2016C V12, resp. TCG2016C V16, spotřebu paliva 1452 kW, resp. 1921 kW [35]. Na základě výhřevnosti bioplynu lze podle rovnice (15) stanovit hodinový průtok paliva.

$$V_8 = V_8^{V12} + V_8^{V16} = \frac{Q_8^{V12}}{LHV_{BP}} \cdot \frac{3600}{1000} + \frac{Q_8^{V16}}{LHV_{BP}} \cdot \frac{3600}{1000} = 565 \text{ m}^3/\text{h} \quad (15)$$

| | | |
|------|-------------|--|
| kde: | V_8 | je celkový objemový tok BP pro oba typy KJ [m^3/h] |
| | V_8^{V12} | je objemový tok BP pro KJ TCG2016C V12 [m^3/h] |
| | V_8^{V16} | je objemový tok BP pro KJ TCG2016C V16 [m^3/h] |
| | Q_8^{V12} | je energetická spotřeba paliva pro KJ TCG2016C V12 [kW] |
| | Q_8^{V16} | je energetická spotřeba paliva pro KJ TCG2016C V16 [kW] |

LHV_{BP} je střední výhřevnost bioplynu [kJ/m^3]

$$LHV_{BP} = 21,5 \cdot 10^3 \text{ kJ}/\text{m}^3 [33]$$

Průtok spalovacího vzduchu (SV) opět vychází z technických parametrů KJ (tabulka 10). Celkový objemový průtok vzduchu pro oba typy KJ byl stanoven dle rovnice (16):

$$V_9 = V_9^{V12} + V_9^{V16} = \frac{m_{air}^{V12}}{\rho_{air}^{20^\circ\text{C}}} + \frac{m_{air}^{V16}}{\rho_{air}^{20^\circ\text{C}}} = \mathbf{5912 \text{ m}^3/\text{h}} \quad (16)$$

kde: V_9 je celkový objemový tok SV pro oba typy KJ [m^3/h]

V_9^{V12} je objemový tok SV pro KJ TCG2016C V12 [m^3/h]

V_9^{V16} je objemový tok SV pro KJ TCG2016C V16 [m^3/h]

m_{air}^{V12} je průtok SV pro KJ TCG2016C V12 [kg/h]

m_{air}^{V16} je průtok SV pro KJ TCG2016C V16 [kg/h]

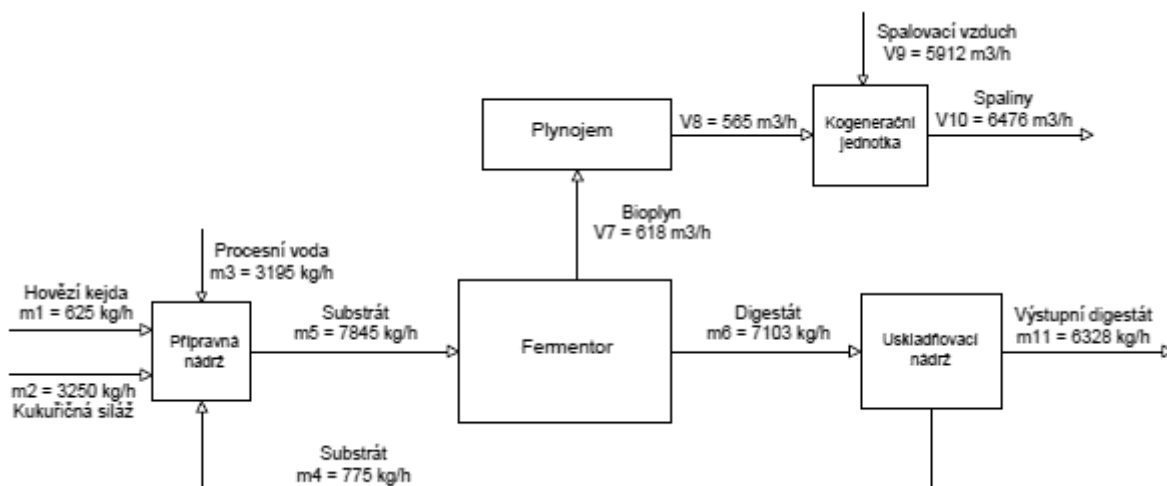
$\rho_{air}^{20^\circ\text{C}}$ je hustota vzduchu při 20°C [kg/m^3]

$$\rho_{air}^{20^\circ\text{C}} = 1,2 \text{ kg}/\text{m}^3 [37]$$

Ze stanovených hodnot průtoků paliva a spalovacího vzduchu lze pomocí materiálové bilance KJ stanovit objemový tok spalin. Bilance KJ, z níž vychází výsledný průtok spalin, je popsána rovnicí (17):

$$V_{10} = V_8 + V_9 = \mathbf{6476 \text{ m}^3/\text{h}} \quad (17)$$

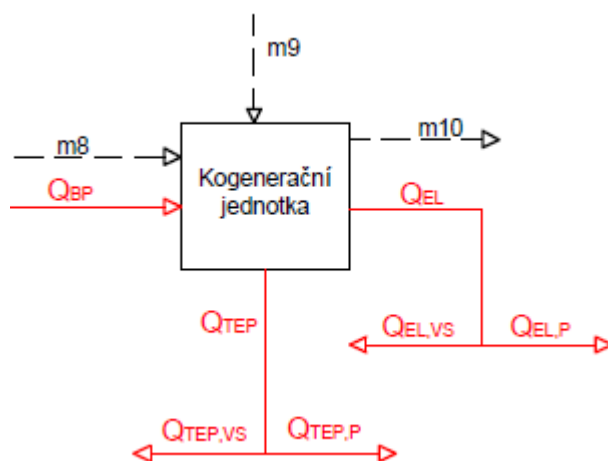
Tímto je materiálová bilance obecné BPS kompletní a nyní bude stanovena energetická bilance této stanice. Obrázek 29 nabízí souhrn všech důležitých materiálových toků OBPS.



Obrázek 29: Materiálová bilance OBPS

4.1.2 Energetická bilance obecné BPS

Energetická bilance OBPS definuje hospodaření BPS s energií. Principem BPS je přeměnit energii uloženou v bioplynu na energii elektrickou a tepelnou. Část elektrické i tepelné energie potřebuje BPS pro svůj vlastní chod. Nicméně, zbývající, většinový podíl energie (tzv. přebytečnou energii) může distribuovat do veřejných sítí či ke spotřebitelům, což pro BPS představuje hlavní zdroj zisku. Obrázek 30 znázorňuje toky energií v OBPS.



Obrázek 30: Přehled energetických toků v OBPS

Energie bioplynu Q_{BP} je dána průtokem BP a jeho výhřevností. Průtoky paliva pro oba typy KJ vychází z parametrů zařízení (tabulka 10) a stanovení jejich přesné hodnoty je součástí přílohy 1. Rovnice (18) udává vztah pro výpočet energie uložené v bioplynu.

$$Q_{BP} = Q_{BP}^{V12} + Q_{BP}^{V16} = \frac{V_{BP}^{V12} \cdot LHV_{BP}}{3600} + \frac{V_{BP}^{V16} \cdot LHV_{BP}}{3600} = 3373 \text{ kW} \quad (18)$$

kde: Q_{BP} je celková energie bioplynu vstupujícího do KJ [kW]

Q_{BP}^{V12} je energie BP vstupujícího do KJ TCG2016C V12 [kW]

Q_{BP}^{V16} je energie BP vstupujícího do KJ TCG2016C V16 [kW]

V_{BP}^{V12} je průtok BP pro KJ typu TCG2016C V12 [m³/h]

$$V_{BP}^{V12} = 243,1 \text{ m}^3/\text{h}$$

V_{BP}^{V16} je průtok BP pro KJ typu TCG2016C V16 [m³/h]

$$V_{BP}^{V16} = 321,7 \text{ m}^3/\text{h}$$

LHV_{BP} je výhřevnost bioplynu [kJ/m³]

$$LHV_{BP} = 21,5 \cdot 10^3 \text{ kJ/m}^3 [33]$$

Spalováním bioplynu v kogeneračních jednotkách se přeměňuje energie bioplynu na energii elektrickou a tepelnou. Úspěšnost této přeměny závisí na tepelné a elektrické účinnosti jednotlivých typů KJ (účinnosti obou typů KJ jsou uvedeny v tabulce 10). Rovnice (19) vyjadřuje množství elektrické energie získané spalováním bioplynu, rovnice (20) množství energie tepelné.

$$Q_{EL} = Q_{EL}^{V12} + Q_{EL}^{V16} = Q_{BP}^{V12} \cdot \eta_{EL}^{V12} + Q_{BP}^{V16} \cdot \eta_{EL}^{V16} = \mathbf{1399 \text{ kW}} \quad (19)$$

kde: Q_{EL} je celková získaná elektrická energie [kW]
 Q_{EL}^{V12} je elektrická energie získaná z KJ TCG2016C V12 [kW]
 Q_{EL}^{V16} je elektrická energie získaná z KJ TCG2016C V16 [kW]
 η_{EL}^{V12} je elektrická účinnost KJ TCG2016C V12 [-]
 η_{EL}^{V16} je elektrická účinnost KJ TCG2016C V16 [-]

$$Q_{TEP} = Q_{TEP}^{V12} + Q_{TEP}^{V16} = Q_{BP}^{V12} \cdot \eta_{TEP}^{V12} + Q_{BP}^{V16} \cdot \eta_{TEP}^{V16} = \mathbf{1490 \text{ kW}} \quad (20)$$

kde: Q_{TEP} je celková získaná tepelná energie [kW]
 Q_{TEP}^{V12} je tepelná energie získaná z KJ TCG2016C V12 [kW]
 Q_{TEP}^{V16} je tepelná energie získaná z KJ TCG2016C V16 [kW]
 η_{TEP}^{V12} je tepelná účinnost KJ TCG2016C V12 [-]
 η_{TEP}^{V16} je tepelná účinnost KJ TCG2016C V16 [-]

Energetická bilance KJ porovnává energii na vstupu (energie BP) a na výstupu (elektrická a tepelná energie) tohoto uzlu. Jinými slovy udává celkovou účinnost kogenerace elektřiny a tepla. Rozdíl vstupní a výstupní energie představuje tzv. ztrátovou energii Q_{ZT}^{KJ} , jejíž hodnota je vyčíslena rovnicí (21). Rovnice (22) vyjadřuje celkovou účinnost KJ η_{tot}^{KJ} .

$$Q_{ZT}^{KJ} = Q_{BP} - (Q_{EL} + Q_{TEP}) = \mathbf{484 \text{ kW}} \quad (21)$$

$$\eta_{tot}^{KJ} = \frac{Q_{EL} + Q_{TEP}}{Q_{BP}} \cdot 100 = \mathbf{85,6 \%} \quad (22)$$

Část získané energie, elektrické i tepelné, spotřebovává BPS pro svůj vlastní provoz. V případě této OBPS vlastní spotřeba energie vychází opět z reálné BP Slavkov u Brna. Tato stanice využívá 6 % z vyrobené elektrické energie a 20 % z tepelné (DVP7 a DVP8). Zbývající množství elektřiny je dodáváno do rozvodné elektrické sítě. Naopak přebytečné teplo OBPS žádným způsobem nevyužívá (maří ho do okolí). Rovnice (23) až (26) popisují hospodaření s energií v rámci OBPS.

$$Q_{EL}^{VS} = 0,06 \cdot Q_{EL} = \mathbf{84 \text{ kW}} \quad (23)$$

$$Q_{EL}^P = Q_{EL} - Q_{EL}^{VS} = \mathbf{1315 \text{ kW}} \quad (24)$$

kde: Q_{EL}^{VS} je elektrická energie pro vlastní potřebu OBPS [kW]
 Q_{EL}^P je přebytečná elektrická energie – distribuována do RES [kW]

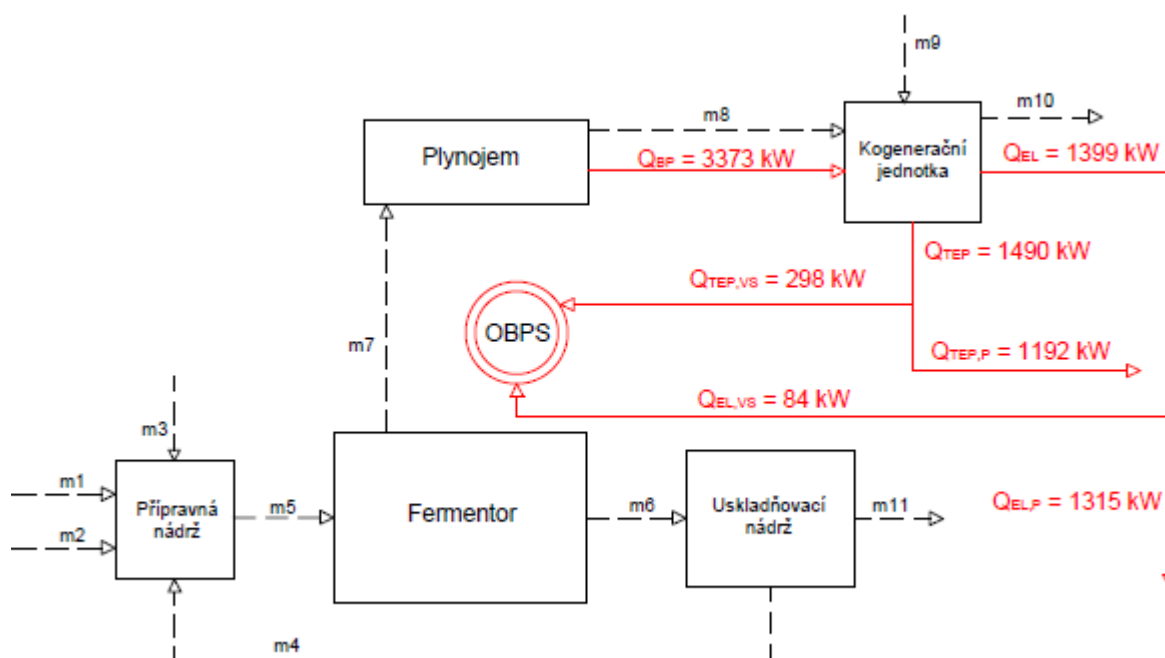
$$Q_{TEP}^{VS} = 0,2 \cdot Q_{TEP} = \mathbf{298 \text{ kW}} \quad (25)$$

$$Q_{TEP}^P = Q_{TEP} - Q_{TEP}^{VS} = \mathbf{1192 \text{ kW}} \quad (26)$$

kde: Q_{TEP}^{VS} je tepelná energie pro vlastní potřebu OBPS [kW]

Q_{TEP}^P je přebytečná tepelná energie – mařena do okolí [kW]

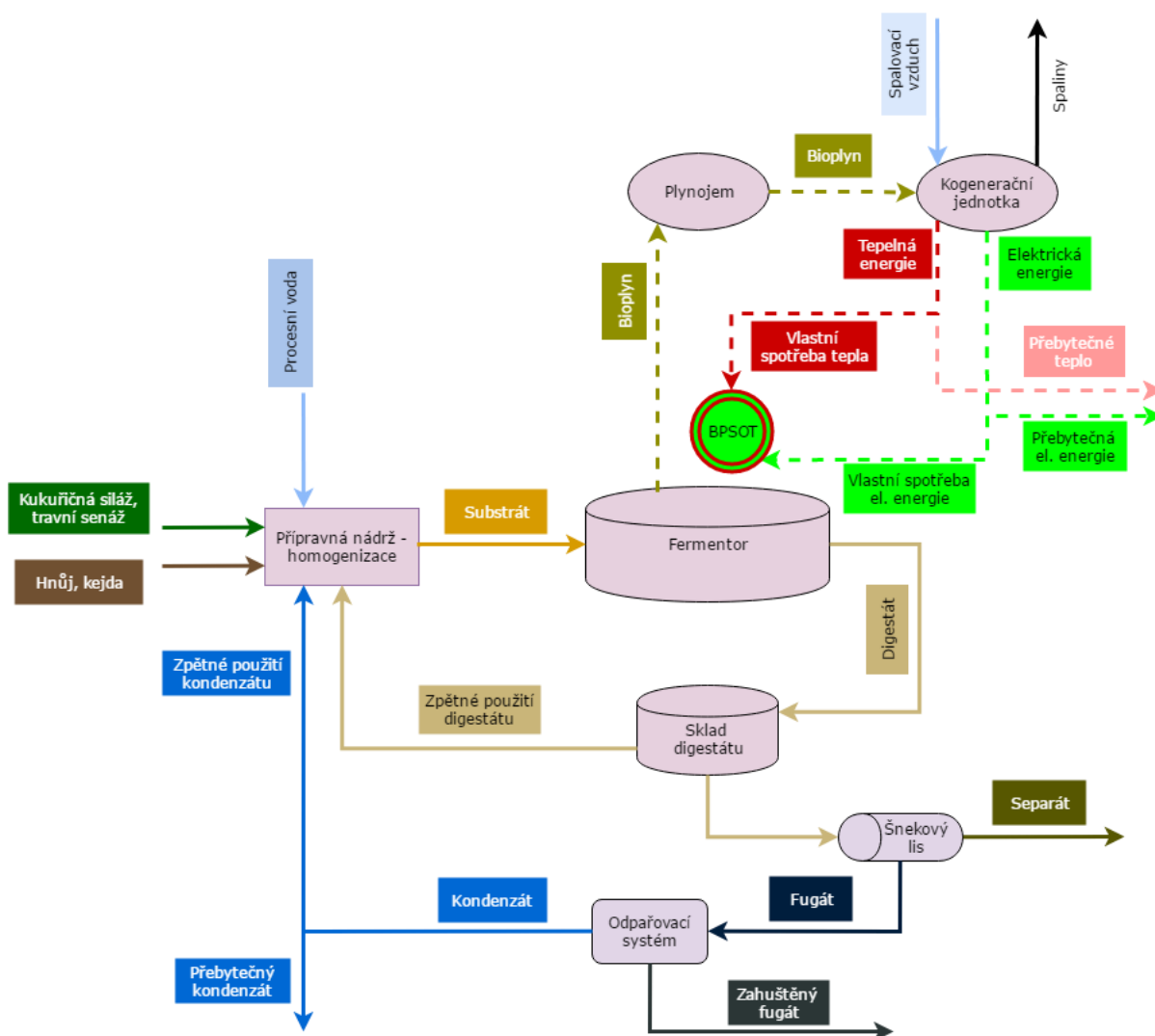
OBPS vyrábí elektrickou a tepelnou energii s účinností okolo 85 %. Po spotřebování určitého množství energie pro vlastní provoz (roční spotřeba je necelých 700 MWh elektrické energie a 90 TJ tepelné energie) disponuje tato BPS relativně značným množstvím energie, kterou lze dále zužít. Přehled jmenovitých energetických parametrů OBPS znázorňuje obrázek 31.



Obrázek 31: Energetická bilance OBPS

4.2 MEB BPS s ODVODŇOVACÍ TECHNOLOGIÍ DIGESTÁTŮ

BPSOT je v podstatě OBPS doplněná o zařízení na zpracování digestátu. Jak již bylo zmíněno, v této diplomové práci bude uvažována takováto úprava digestátu: mechanické oddělení separátu/fugátu a následné zahuštění fugátu odpařovacím procesem. Mechanickou separaci FZ zajišťuje šnekový lis, zahuštění kapalně fáze digestátu probíhá v odpařovacím systému. Zařazení těchto zařízení v systému BPS a celkové schéma BPSOT znázorňuje obrázek 32.



Obrázek 32: Schéma BPS s odvodňovací technologií digestátu

Pro úpravu digestátu v BPSOT bude použit horizontální šnekový separátor od společnosti SEPCOM (model *SEPCOM Biogas SEP BIOH11502*). Tento šnekový lis (obrázek 33) je ideální pro separaci digestátu s vyšším obsahem vlákna (siláž z kukuřice, chlévské mrvy) [38]. Tabulka 11 uvádí technické parametry tohoto separátoru, které budou použity při tvorbě MEB BPSOT.



Obrázek 33: Horizontální šnekový separátor SEPCOM [38]

Oddělený separát není dále upravován a může být použit jako hnojivo či jako materiál pro tvorbu podestýlky zvířem. Tekutý fugát, jak znázorňuje obrázek 32, pokračuje do odpařovacího systému, kde dochází k odpaření určitého množství vody (vzniklá pára opouští systém ve formě kondenzátu) a tím tedy k zahuštění a zvýšení koncentrace sušiny ve fugátu. Zahuštěný fugát je poté aplikován na zemědělskou půdu, kondenzát se využívá k naředění vstupních surovin nebo se vypouští do okolí. Má-li být kondenzát vypouštěn do povrchových vod, musí být dodržena jeho požadovaná čistota a nezávadnost. Fugát proto bývá před svým vstupem do odpařovacího systému upravován přidáním kyseliny sírové H_2SO_4 . Kyselina zajistí snížení pH fugátu a také výskyt dusíku ve formě iontů NH_4^+ , což při odpařování fugátu vede k zakonzervování veškerého dusíku ve výsledném koncentrátu [15]. V případě potřeby může být vzniklý kondenzát čištěn např. procesem reverzní osmózy. Při tvorbě následující bilance je množství přidané kyseliny sírové zanedbáno a rovněž se neuvažuje s dalším krokem čištění kondenzátu. Pro tuto diplomovou práci byl zvolen vícestupňový odpařovací systém (obrázek 21) vycházející z odborné literatury (nejedná se tedy o konkrétní zařízení vyskytující se na trhu). Parametry modelového odpařovacího systému jsou uvedeny v tabulce 12 (tabulka byla vytvořena dle [15] a [32]).

| Parametr | Jednotka | SEPBIOH11502 |
|---------------------------------|-------------------|-------------------|
| Průměr | mm | 150 |
| Rozměry (d x š x v) | mm | 1420 x 660 x 1800 |
| Příkon | kW | 2,2 |
| Maximální průtok ²² | m ³ /h | 15 |
| Podíl pevných částic v separátu | % | až 30 |

Tabulka 11: Technické parametry separátoru [38]

²² Uvedený maximální průtok byl stanoven pro čistou vodu. Skutečný průtok je závislý na charakteru zpracovávaného materiálu, konfiguraci stroje, jeho údržbě a provozních podmínkách [38].

| Parametr | Jednotka | Odpařovací systém |
|---------------------------------------|----------------------|-------------------|
| Počet stupňů | - | 3 |
| Tepelná energetická náročnost procesu | kWh/t _{H2O} | 300–350 |
| Podíl sušiny v koncentrátu | % | 10–12 |

Tabulka 12: Technické parametry vícestupňového odpařovacího systému

Materiálová a energetická bilance BPSOT vychází ze stejných podmínek jako MEB obecné BPS. Shoduje se druh a množství vstupních surovin, kogenerační jednotka a stejně tak platí doplňující výchozí parametry DVP1 až DVP8. K těmto vstupním podmínkám byly ještě přidány následující:

- DVP9: Koncentrace sušiny v separátu je 25 %. ²³
- DVP10: Koncentrace sušiny ve fugátu je 3 %. ²⁴
- DVP11: Spotřeba elektrické energie pro chod šnekového lisu je 2,2 kW. ²⁵
- DVP12: Podíl sušiny v koncentrátu fugátu je 11 %. ²⁶
- DVP13: Podíl sušiny v kondenzátu z odpařovacího systému je 0,0 %. ²⁷
- DVP14: Teplo potřebné k odpaření jedné tuny vody z fugátu je 325 kWh. ²⁸
- DVP15: Spotřeba elektrické energie odpařovacího systému k odpaření 1 m³ kondenzátu je 15 kWh. ²⁹

4.2.1 Materiálová bilance BPS s odvodňovací technologií

Materiálová bilance BPSOT vychází z materiálové bilance OPBS. Obě stanice disponují stejným množstvím vstupního substrátu (v případě BPSOT je část procesní vody nahrazena kondenzátem z odpařovacího procesu – viz dále), ve fermentorech vzniká rovnocenné množství bioplynu, který je dále spalován v kogeneračních jednotkách za stejných podmínek. Totožné je i množství a složení výsledného digestátu. Odlišnosti nastávají až při jeho zpracování. BPSOT obsahuje dva nové bilanční uzly: šnekový lis a odpařovací systém. Obrázek 34 nabízí přehled všech proudů v rámci BPSOT. Hodnoty některých

²³ Hodnota koncentrace sušiny v separátu 25 % vychází ze zvoleného separátoru a jeho technických parametrů (tabulka 13).

²⁴ Odborná literatura [14] uvádí obsah sušiny v tekuté frakci digestátu do 3 %. Vzhledem k tomu, že hlavní surovinou obou BPS je kukuřičná siláž (s vysokým podílem sušiny), byla zvolena maximální hodnota tohoto parametru.

²⁵ Jedná se o průměrnou spotřebu elektrické energie zvoleného šnekového separátoru, jež uvádí výrobce zařízení (tabulka 13).

²⁶ Tato hodnota představuje střední hodnotu podílu sušiny v koncentráte fugátu po jeho úpravě ve zvoleném odpařovacím systému (tabulka 14).

²⁷ Je předpokládáno, že zkondenzovaná pára je ideálně čistá, tzn. že kondenzát neobsahuje žádnou sušinu nebo jen zanedbatelné množství.

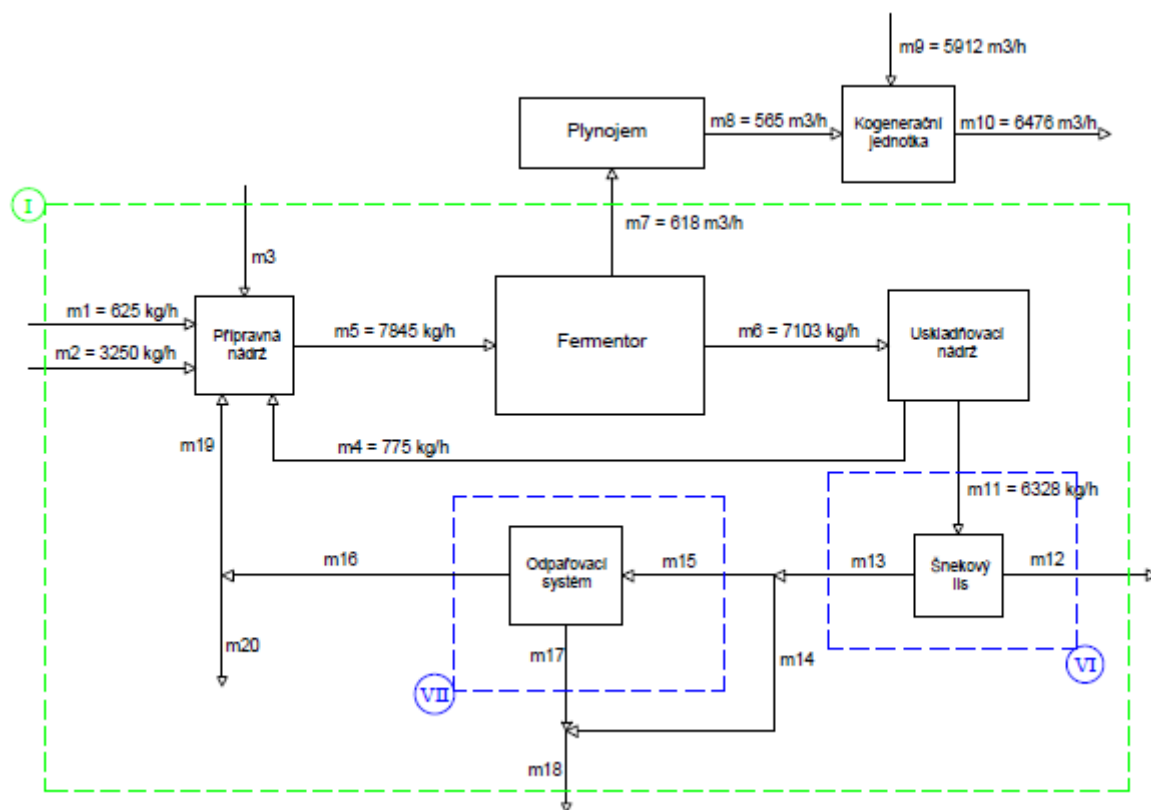
²⁸ Jedná se o průměrnou hodnotu tepelné energetické náročnosti procesu odpařování fugátu dle odborné literatury [15].

²⁹ Zmíněná hodnota byla stanovena na základě konzultace s vedoucím diplomové práce panem Ing. Mgr. Markem Vondrou a vychází z rešeršní části jeho dizertační práce [43].

z nich jsou známy z bilance obecné BPS a byly určeny pomocí rovnic (3) až (17). Velikost a složení nových proudů budou stanoveny v následující kapitole.

Přehled značení proudů a složek:

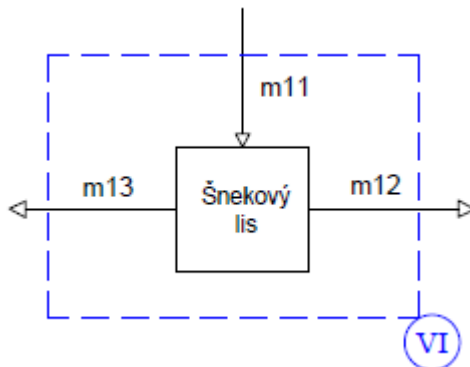
| | | | |
|----|------------------|----|-----------------------------|
| 1 | hovězí kejda | 11 | digestát ke zpracování |
| 2 | kukuřičná siláž | 12 | separát |
| 3 | procesní voda | 13 | fugát (po separaci) |
| 4 | recykl digestátu | 14 | přebytečný fugát |
| 5 | substrát | 15 | fugát k dalšímu zpracování |
| 6 | digestát | 16 | kondenzát |
| 7 | bioplyn | 17 | zahuštěný fugát |
| 8 | upravený bioplyn | 18 | výstupní fugát (ke hnojení) |
| 9 | spalovací vzduch | 19 | recykl kondenzátu |
| 10 | spaliny | 20 | přebytečný kondenzát |
| | | A | sušina |



Obrázek 34: Přehled materiálových proudů v BPSOT

ŠNEKOVÝ LIS VI

Šnekový lis je prvním stupněm úpravy digestátu. Vstupuje do něho digestát z fermentačního procesu a produkty tohoto zpracování jsou separát a fugát (obrázek 35). Rovnice (27) a (28) popisují materiálovou bilanci tohoto uzlu.



Obrázek 35: Materiálová bilance šnekového lisu

$$m_{11} = m_{12} + m_{13} \quad (27)$$

$$m_{11} \cdot x_{11}^A = m_{12} \cdot x_{12}^A + m_{13} \cdot x_{13}^A \quad (28)$$

Množství a složení digestátu m_{11} je známé, stejně tak podíl sušiny v separátu x_{12}^A , resp. ve fugátu x_{13}^A (DVP9, resp. DVP10). Jedná se tedy o soustavu dvou rovnic o dvou neznámých, kde neznámými parametry jsou proudy m_{12} a m_{13} . Vyřešením předchozí soustavy rovnic získáme hodnoty zmíněných proudů:

$$m_{13} = \frac{m_{11} \cdot x_{11}^A - m_{11} \cdot x_{12}^A}{x_{13}^A - x_{12}^A} = 5642 \text{ kg/h} \quad (29)$$

$$m_{12} = m_{11} - m_{13} = 686 \text{ kg/h} \quad (30)$$

ODPAŘOVACÍ SYSTÉM VII

V případě odpařovacího systému je materiálová bilance komplikovanější. Úpravu v tomto zařízení totiž nepodstoupí veškeré množství odděleného fugátu, nýbrž pouze takové množství, k jehož zpracování lze využít přebytečné teplo z BPS (není uvažován externí tepelný zdroj). Tabulka 12 uvádí mj. tepelnou náročnost odpařovacího procesu (DVP14). Na základě tohoto parametru a znalosti přebytečného tepla z kogenerační jednotky – rovnice (26) – lze stanovit množství odpařené vody m_{16} (kondenzátu), která se odpaří využitím volného tepla.

$$m_{16} = \frac{Q_{TEP}^P}{Q_{H_2O}} \cdot 1000 = 3668 \text{ kg/h} \quad (31)$$

kde: m_{16} je množství kondenzátu z odpařovacího systému [kg/h]

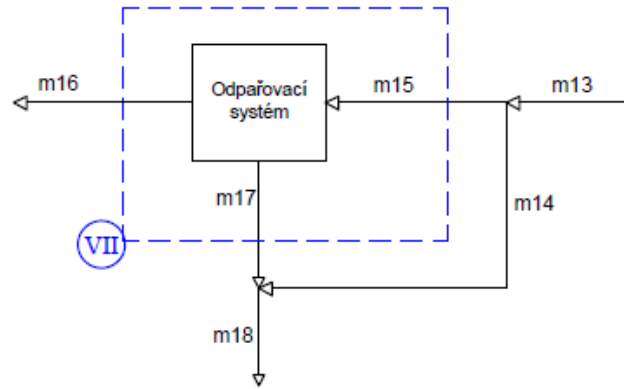
Q_{TEP}^P je přebytečná tepelná energie [kW]

$$Q_{TEP}^P = 1192 \text{ kW}$$

$$Q_{H_2O} \quad \text{je tepelná energie potřebná k odpaření 1 t vody [kWh/t}_{H_2O}]$$

$$Q_{H_2O} = 325 \text{ kWh/t}_{H_2O} \text{ (DVP14)}$$

Nyní lze stanovit materiálovou bilanci odpařovacího systému (obrázek 36), kterou vystihují rovnice (32) a (33), a určit tak množství fugátu, jenž bude tímto zařízením upraveno.



Obrázek 36: Materiálová bilance odpařovacího systému

$$m_{15} = m_{16} + m_{17} \quad (32)$$

$$m_{15} \cdot x_{15}^A = m_{16} \cdot x_{16}^A + m_{17} \cdot x_{17}^A \quad (33)$$

Řešením těchto rovnic jsou průtoky fugátu vstupujícího do odpařovacího systému m_{15} a zahuštěného fugátu m_{17} , který obsahuje 11 % sušiny (DVP12).

$$m_{17} = \frac{m_{16} \cdot x_{16}^A - m_{15} \cdot x_{15}^A}{x_{15}^A - x_{17}^A} = 1375 \text{ kg/h} \quad (34)$$

$$m_{15} = m_{16} + m_{17} = 5043 \text{ kg/h} \quad (35)$$

Fugát, který neprochází odparkou, tzv. přebytečný fugát, je uložen společně se zahuštěným fugátem v koncovém skladu tohoto materiálu. Zmíněný fugát je pak využíván ke hnojení. Množství přebytečného fugátu m_{14} vychází z rovnice (36):

$$m_{14} = m_{13} - m_{15} = 599 \text{ kg/h} \quad (36)$$

Množství a složení digestátu určeného ke hnojení je pak následující:

$$m_{18} = m_{14} + m_{17} = 1974 \text{ kg/h} \quad (37)$$

$$x_{18}^A = \frac{m_{14} \cdot x_{14}^A + m_{17} \cdot x_{17}^A}{m_{14} + m_{17}} = 0,09 = 9 \% \quad (38)$$

Kondenzát z odpařovacího systému bude použit pro naředění vstupních surovin. Jelikož ho je dostatečné množství, lze zkondenzovanou parou zcela nahradit původní procesní vodu. V BPSOT je tedy tok $m_3 = 0 \text{ kg/h}$. Množství kondenzátu pro naředění výchozího materiálu plyne opět z požadavku na podíl sušiny v substrátu $x_5^A = 0,15$ (dle DVP1):

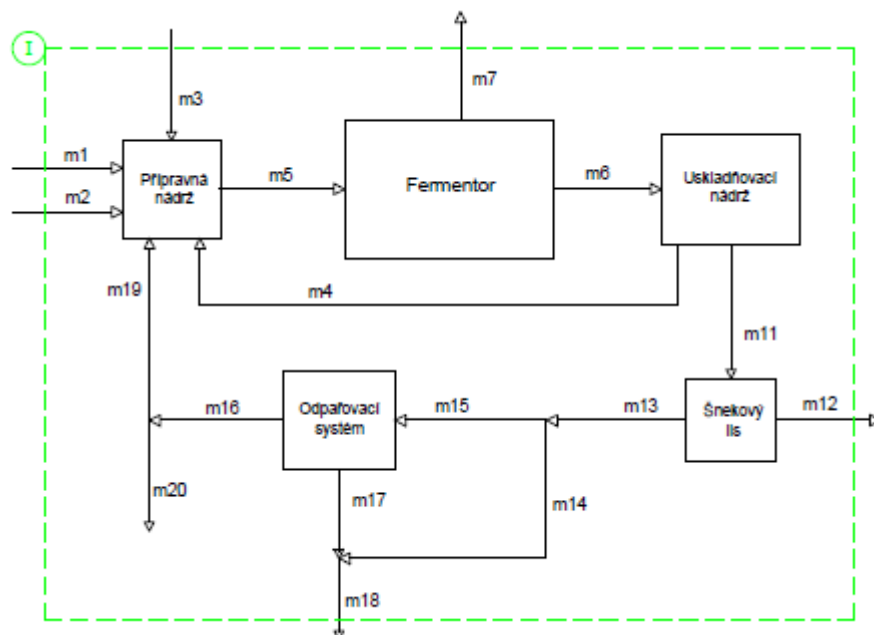
$$m_{16} = \frac{m_1 \cdot (x_1^A - x_5^A) + m_2 \cdot (x_2^A - x_5^A) + m_3 \cdot (x_3^A - x_5^A) + m_4 \cdot (x_4^A - x_5^A)}{x_5^A} = 3195 \text{ kg/h} \quad (39)$$

Přebytečné množství zkondenzované páry, která bude vypouštěna do okolí (za předpokladu její čistoty a vhodnosti k tomuto účelu), je potom $m_{20} = 473 \text{ kg/h}$.

MB FERMENTAČNÍ ČÁSTI BPSOT I

V BPSOT jsou do tzv. fermentační části bioplynové stanice (obrázek 37) zahrnuty následující aparáty: přípravná nádrž, fermentor, uskladňovací nádrž, šnekový lis a odpařovací systém.

I v tomto případě materiálová bilance tohoto souboru více zařízení slouží především pro kontrolu jednotlivých proudů. Rovnost vstupních a výstupních proudů (celkových i přes složku A) je prokázána rovnicemi (40) a (41).



Obrázek 37: Materiálová bilance fermentační části BPSOT

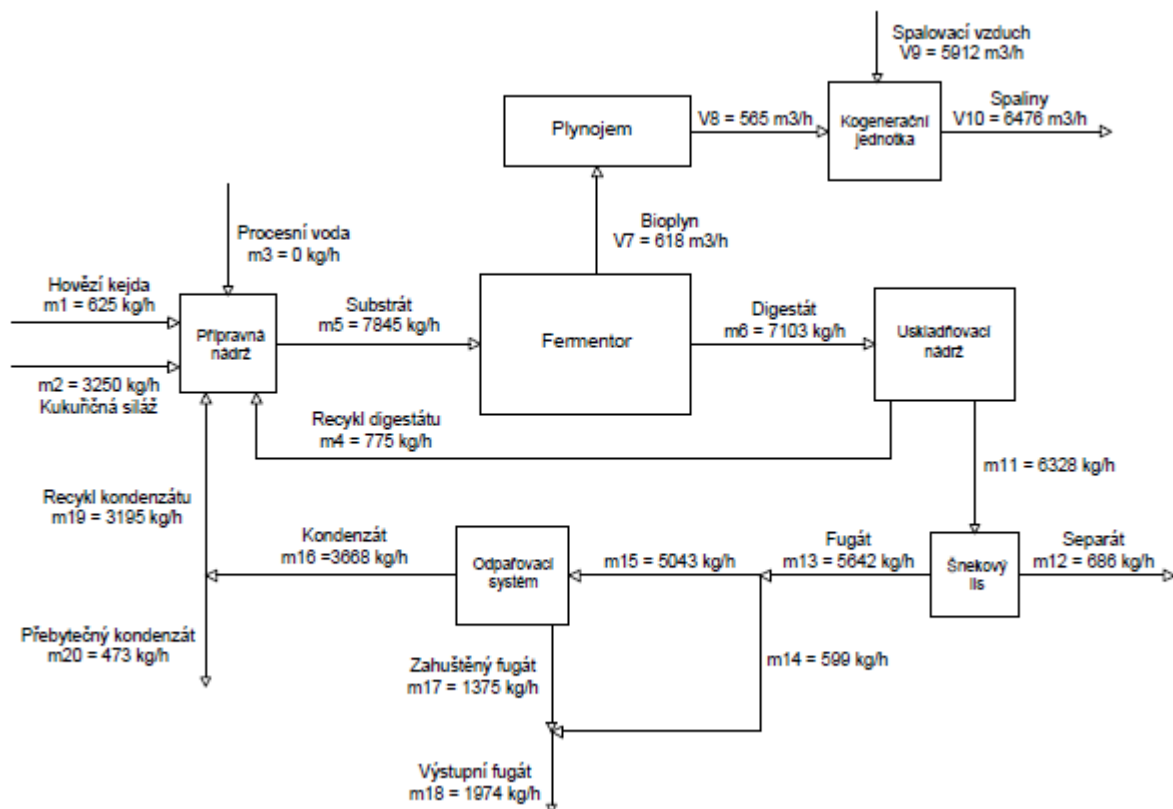
$$m_1 + m_2 + m_3 = m_7 + m_{12} + m_{18} + m_{20} \quad (40)$$

$$3875 \text{ kg/h} = 3875 \text{ kg/h}$$

$$m_1 \cdot x_1^A + m_2 \cdot x_2^A + m_3 \cdot x_3^A = m_7 \cdot x_7^A + m_{12} \cdot x_{12}^A + m_{18} \cdot x_{18}^A + m_{20} \cdot x_{20}^A \quad (41)$$

$$1135 \text{ kg/h} = 1135 \text{ kg/h}$$

Materiálová bilance BPSOT je tímto kompletní, obrázek 38 nabízí přehled jednotlivých proudů v rámci této stanice. Následně bude představena energetická bilance BPSOT.



Obrázek 38: Materiálová bilance BPSOT

4.2.2 Energetická bilance BPS s odvodňovací technologií

Energetická bilance bioplynové stanice se zařízením na odvodnění digestátu je velmi podobná energetické bilanci OBPS. Vzhledem k tomu, že je uvažována totožná produkce bioplynu a užití stejných typů kogeneračních jednotek, je k dispozici stejné množství elektrické a tepelné energie. Nakládání s vyrobenou energií je rovněž podobné. Část elektrické energie je nutné použít pro správný chod BPSOT, tento podíl je oproti OBPS navýšen o energii spotřebovanou přídatnými zařízeními, a zbývající elektrická energie je opět distribuována do veřejné elektrické sítě. Tepelná energie se používá k vytápění fermentorů. Přebytné teplo je v tomto případě maximálně využito v odpařovacím systému k částečnému odvodnění fugátu. Obrázek 39 znázorňuje energetické toky v BPSOT.

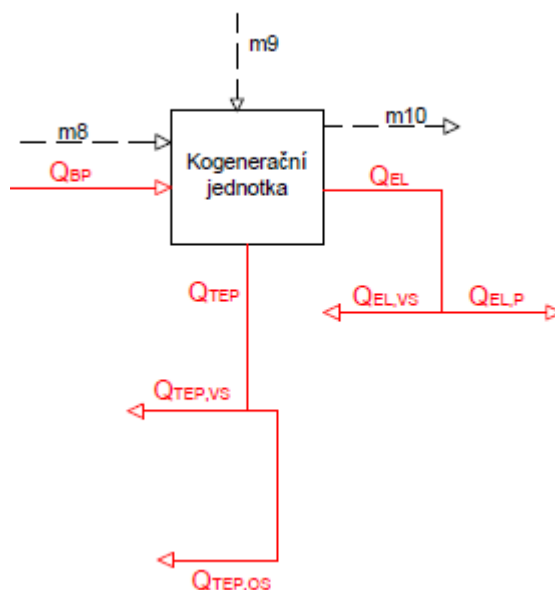
Energii dostupnou v bioplynu stanovuje rovnice (18):

$$Q_{BP} = Q_{BP}^{V12} + Q_{BP}^{V16} = \frac{V_{BP}^{V12} \cdot LHV_{BP}}{3600} + \frac{V_{BP}^{V16} \cdot LHV_{BP}}{3600} = \mathbf{3373 \text{ kW}} \quad (18)$$

Toto množství energie je v kogeneračních jednotkách přeměněno na 1399 kW elektrické energie a 1490 kW tepelné – rovnice (19) a (20):

$$Q_{EL} = Q_{EL}^{V12} + Q_{EL}^{V16} = Q_{BP}^{V12} \cdot \eta_{EL}^{V12} + Q_{BP}^{V16} \cdot \eta_{EL}^{V16} = \mathbf{1399 \text{ kW}} \quad (19)$$

$$Q_{TEP} = Q_{TEP}^{V12} + Q_{TEP}^{V16} = Q_{BP}^{V12} \cdot \eta_{TEP}^{V12} + Q_{BP}^{V16} \cdot \eta_{TEP}^{V16} = \mathbf{1490 \text{ kW}} \quad (20)$$



Obrázek 39: Přehled energetických toků v BPSOT

Stanovení množství elektrické energie spotřebované BPSOT vychází z rovnice (23). Tato rovnice je doplněna o členy zohledňující spotřebu elektrické energie šnekovým lisem a odpařovacím systémem. Celkové množství elektrické energie pro vlastní potřebu je tedy následující:

$$Q_{EL}^{VS} = 0,06 \cdot Q_{EL} + Q_{EL}^{\text{šL}} + Q_{EL}^{OS} = \mathbf{141 \text{ kW}} \quad (42)$$

kde: Q_{EL}^{VS} je elektrická energie pro vlastní potřebu BPSOT [kW]
 $Q_{EL}^{\text{šL}}$ je elektrická energie spotřebovaná šnekovým lisem [kW]
 $Q_{EL}^{\text{šL}} = 2,2 \text{ kW}$ (DVP11)
 Q_{EL}^{OS} je elektrická energie pro chod odpařovacího systému [kW]
 $Q_{EL}^{OS} = 55 \text{ kW}$ ³⁰

Elektrická energie dodávaná do RES – tzv. přebytečná elektrická energie, je opět rovna rozdílu celkové vyrobené energie a energie spotřebované v bioplynové stanici (v případě BPSOT je tedy nižší o výše uvedenou hodnotu energie, jež spotřebuje separátor):

$$Q_{EL}^P = Q_{EL} - Q_{EL}^{VS} = \mathbf{1258 \text{ kW}} \quad (43)$$

BPSOT maximálně využívá získanou tepelnou energii. Pro vytápění fermentorů je spotřebováno stejné množství energie jako v případě OBPS – tedy dle rovnice (25):

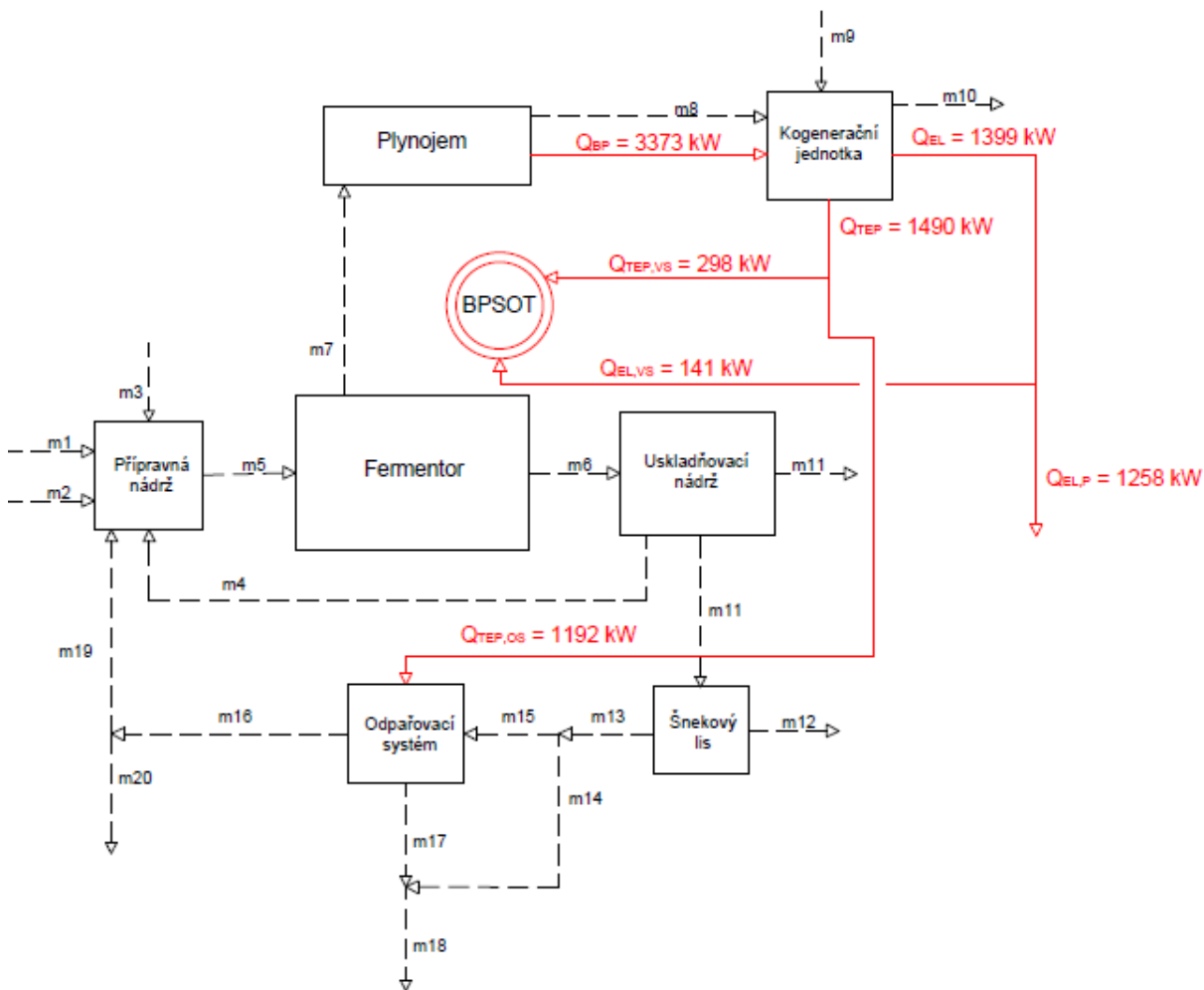
$$Q_{TEP}^{VS} = 0,2 \cdot Q_{TEP} = \mathbf{298 \text{ kW}} \quad (25)$$

³⁰ Spotřeba elektrické energie odpařovacím systémem vychází z parametru DVP15 a množství vzniklého kondenzátu. Podrobný výpočet je uveden v listu *MEB BPSOT* přílohy č. 1.

OBPS přebytečné teplo mařila do okolí. BPSOT však toto teplo využívá k odpaření určitého množství vody z fugátu, čímž docílí snížení jeho objemu a také získá procesní vodu k naředění vstupních surovin. Množství tepla využitého v odpařovacím systému stanovuje rovnice (44).

$$Q_{TEP}^{OS} = Q_{TEP} - Q_{TEP}^{VS} = 1192 \text{ kW} \quad (44)$$

Snahou BPSOT je využít co nejvíce volné energie v rámci provozu bioplynové stanice a snížit tak neefektivní maření přebytečné energie do okolí. Obrázek 40 shrnuje energetickou bilanci BPSOT a nabízí přehled jednotlivých energetických proudů, vč. jejich hodnot.



Obrázek 40: Energetická bilance BPSOT

5 Zhodnocení návrhu odvodňovací technologie digestátu

BPSOT zahrnuje technologii na odvodnění FZ z anaerobního procesu. Úkolem této technologie je zredukovat množství vzniklého digestátu a zvýšit v něm koncentraci živin. Rovněž lze během úpravy digestátu získat další vedlejší produkty, např. procesní vodu. BPSOT, jež byla zvolena v této diplomové práci, zpracovává FZ ve dvou krocích: nejprve probíhá separace tuhé a kapalné frakce digestátu a poté následuje zahuštění fugátu v odpařovacím systému. OBPS naopak digestát žádným způsobem neupravuje a přímo jej aplikuje jako zemědělské hnojivo. Tato kapitola nabízí zhodnocení návrhu zařazení odvodňovací technologie digestátu do BPS a také vzájemné porovnání obou typů BPS (detailní porovnání zmíněných BPS uvedené v následující kapitole je součástí přílohy č. 1 – list *Srovnání BPS*).

SROVNÁNÍ BPS Z HLEDISKA MATERIÁLOVÉ BILANCE

Oba typy BPS používají stejné množství vstupních materiálů, produkují totožné množství bioplynu i FZ. Tabulka 13 nabízí přehled surovin, resp. produktů, zpracovaných, resp. vzniklých, v obou BPS během ročního provozu³¹ stanice.

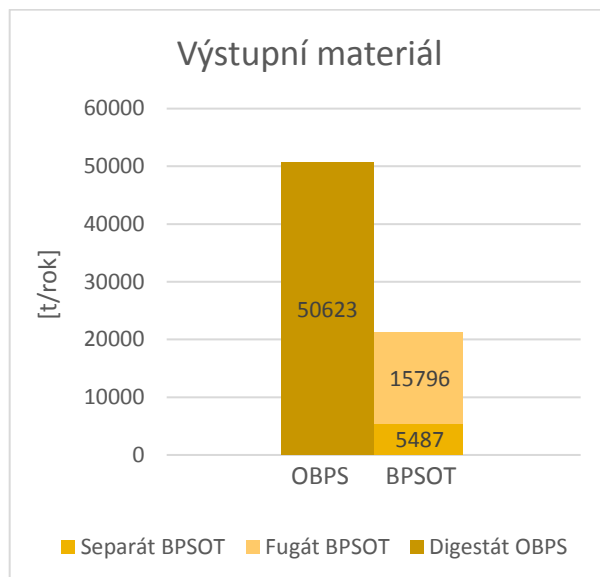
| Suroviny/produkty | Jednotka | Množství |
|------------------------|---------------------|----------|
| <i>Hovězí kejda</i> | t/rok | 5000 |
| <i>Kukuřičná siláž</i> | t/rok | 26000 |
| <i>Digestát</i> | t/rok | 56823 |
| <i>Bioplyn</i> | m ³ /rok | 4946588 |

Tabulka 13: Technické parametry vícestupňového odpařovacího systému

Rozdílnost obou BPS nastává při nakládání s digestátem. OBPS většinu digestátu uchovává v uskladňovací nádrži a využívá jej k zemědělským účelům. Malý podíl vyprodukovaného FZ je zpětně použit v BPS pro naočkování vstupního substrátu. Recykl digestátu je rovněž uvažován i u BPSOT. Zbývající množství FZ před jeho využitím však tato stanice nejprve zpracuje a zredukuje tak jeho objem. Obrázek 41 srovnává konečné množství výstupního FZ z obou BPS.

Z obrázku 41 je zřejmé, že OBPS disponuje více jak dvojnásobným množstvím FZ, který je určen k dalšímu využití. S tím jsou spojené i vyšší náklady na uskladnění materiálu a především na jeho transport na místo pozdější aplikace (zemědělskou půdu). V případě BPSOT jsou k dispozici dva produkty, s kterými může být nakládáno různým způsobem. Fugát, jenž obsahuje většinu rostlinám prospěšných živin, je používán jako hnojivo. Separát je rovněž možné využít, vedle přímých hnojících a rekultivačních aplikací, také při tvorbě speciálních hnojiv, podestýlek či alternativních tuhých paliv (pro stanovení úspor nákladů na dopravu bude uvažováno, že je separát používán rovněž jako hnojivo).

³¹ Roční fond pracovní doby je 8000 hodin.



Obrázek 41: Porovnání roční produkce výstupního materiálu obou BPS

Náklady na dopravu produktů na místa jejich zužitkování jsou dány množstvím transportovaného materiálu, dopravní vzdáleností, kapacitou přepravních zařízení, spotřebou a cenou pohonných hmot. Je-li průměrná dopravní vzdálenost rovna 10 km, kapacita přepravního zařízení 20 t, průměrná spotřeba paliva nákladního vozidla 20 l na 100 km a cena paliva 30 Kč za litr, bude pak roční úspora nákladů na logistiku odvodněného materiálu následující: ³²

$$N_{DOP}^{\dot{U}S} = \frac{m_{dig}^{OBPS} - (m_{sep}^{BPSOT} + m_{fug}^{BPSOT})}{m_{kap}^{NV}} \cdot 2 \cdot L \cdot \frac{S_{ph}}{100} \cdot C_{ph} = \mathbf{176\,041\,Kč/rok} \quad (45)$$

kde: $N_{DOP}^{\dot{U}S}$ je úspora nákladů na dopravu výstupního materiálu [Kč/rok]

m_{dig}^{OBPS} je produkce digestátu OBPS [t/rok]

$$m_{dig}^{OBPS} = 50623 \text{ t/rok}$$

m_{sep}^{BPSOT} je produkce separátu BPSOT [t/rok]

$$m_{sep}^{BPSOT} = 5487 \text{ t/rok}$$

m_{fug}^{BPSOT} je produkce zahuštěného fugátu BPSOT [t/rok]

$$m_{fug}^{BPSOT} = 15796 \text{ t/rok}$$

m_{kap}^{NV} je přepravní kapacita nákladního vozidla [t]

$$m_{kap}^{NV} = 20 \text{ t}$$

³² Parametry vystupující v rovnici (45) vycházejí z materiálových bilancí BPS či z odborné literatury. Přepravní kapacita nákladního vozu je totožná s kapacitou vozidla používaného v areálu BPS Slavkov u Brna [34]. Průměrná dopravní vzdálenost byla zvolena dle vlastního odhadu. Spotřeba paliva u zemědělských nákladních vozidel se většinou udává v litrech na hodinu provozu vozidla [l/hod] (vč. práce na poli apod.). Nicméně, po prostudování několika internetových článků a diskusí lze říci, že průměrná spotřeba paliva zemědělských vozů se pohybuje v rozmezí 15 až 25 litrů na 100 km. Zde byla zvolena průměrná hodnota spotřeby, tedy 20 l na 100 km. Cena pohonných hmot aktuálně kolísá kolem hodnoty 30 Kč za litr [44]

| | |
|----------|---|
| L | je průměrná dopravní vzdálenost [km] $L = 10 \text{ km}$ |
| S_{ph} | je průměrná spotřeba paliva nákladního vozu [l/km] $S_{pal} = 20 \text{ l/km}_{100}$ |
| C_{ph} | je průměrná cena pohonných hmot [Kč/l] $C_{pal} = 30 \text{ Kč/l}$ |

Kromě zahuštěného fugátu produkuje odpařovací systém také značné množství kondenzátu, jenž v BPSOT zcela nahrazuje procesní vodu. To představuje další snížení provozních nákladů BPSOT oproti OBPS. Roční úsporu nákladů za procesní vodu vyjadřuje rovnice (46):

$$N_{PV}^{\text{ÚS}} = \frac{1000 \cdot m_{kond}}{\varrho_{PV}} \cdot C_{PV} = \mathbf{2\ 176\ 869 \text{ Kč/rok}} \quad (46)$$

| | | |
|------|----------------------|---|
| kde: | $N_{PV}^{\text{ÚS}}$ | je úspora nákladů za procesní vodu [Kč/rok] |
| | m_{kond} | je množství kondenzátu nahrazující procesní vodu [t/rok] $m_{kond} = 25559 \text{ t/rok}$ |
| | ϱ_{PV} | je průměrná hustota procesní vody/kondenzátu [kg/m^3] $\varrho_{PV} = 998 \text{ kg/m}^3$ ³³ |
| | C_{PV} | je průměrná cena procesní vody [Kč/ m^3] $C_{PV} = 85 \text{ Kč/m}^3$ ³⁴ |

Úspora nákladů za procesní vodu je poměrně značná. Je ovšem třeba připomenout, že takováto úspora nastane tehdy, odebírá-li OBPS veškerou procesní vodu z obecního vodovodu. To znamená, že BPS nevyužívá vodu z vlastních zdrojů (např. studniční či dešťovou vodu). U zemědělských BPS je tento případ spíše výjimečný. Nicméně, vodní hospodářství jednotlivých BPS se liší a pro zhodnocení návrhu odvodňovací technologie v této diplomové práci bude uvažován odběr veškeré procesní vody z obecního vodovodu.

³³ Jako průměrná hodnota hustoty kondenzátu je uvažována hustota vody při 20 °C, tedy $\varrho_{PV} = 998 \text{ kg/m}^3$ [45].

³⁴ Jedná se o aktuální cenu vody za 1 metr krychlový (vodné + stočné) pro obec Slavkov u Brna [46].

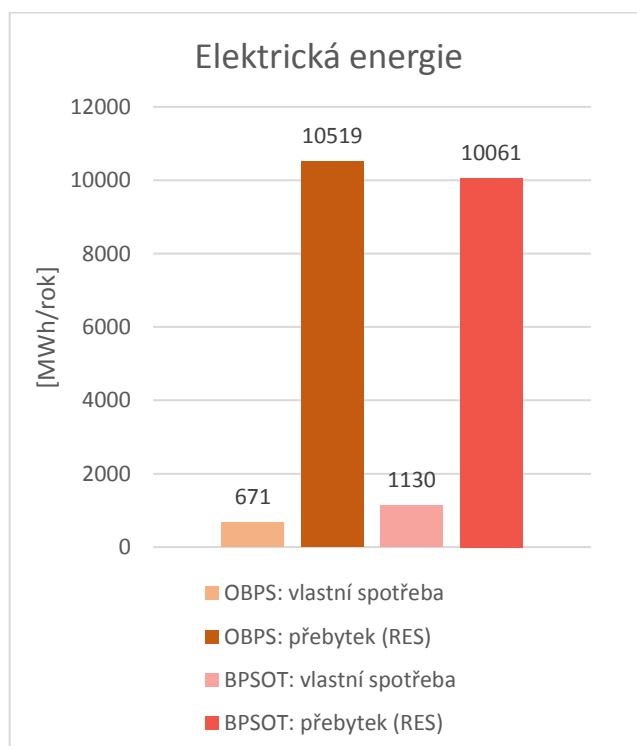
SROVNÁNÍ BPS Z HLEDISKA ENERGETICKÉ BILANCE

Další odlišnost zmíněných BPS spočívá nakládání s vyrobenou (především pak přebytečnou) energií. Oba typy BPS disponují stejným množstvím získaného bioplynu, který je spalován v totožných kogeneračních jednotkách, a tím je tedy rovnocenné i množství vyrobené elektrické a tepelné energie. Tabulka 14 shrnuje roční produkci jednotlivých druhů energie.

| Druh energie | Jednotka | Množství |
|--------------------|----------|----------|
| Energie v bioplynu | GJ/rok | 97142 |
| Elektrická energie | MWh/rok | 11190 |
| Tepelná energie | GJ/rok | 42910 |

Tabulka 14: Přehled dostupných energií v obou typech BPS

BPS spotřebovávají část vyrobené elektrické energie pro zajištění vlastního chodu. V případě BPSOT je tento podíl vyšší, neboť zmíněná BPS obsahuje přídatná zařízení o určité spotřebě elektrické energie. Zbytek elektrické energie je v obou případech distribuován do veřejné rozvodné elektrické sítě. Obrázek 42 srovnává nakládání s elektrickou energií obou BPS.



Obrázek 42: Nakládání s elektrickou energií v rámci obou BPS

Z elektrické energie distribuované do RES mají BPS hlavní zisk. Jelikož BPSOT spotřebovává větší množství energie pro vlastní provoz, je tento její zisk nižší. Úbytek potenciálního zisku vyčísluje rovnice (47):

$$Z_{EL}^{UB} = (Q_{EL,RES}^{OBPS} - Q_{EL,RES}^{BPSOT}) \cdot C_{EL} = -1\,888\,983 \text{ Kč/rok} \quad (47)$$

kde: Z_{EL}^{UB} je úbytek potenciálního zisku z prodané elektřiny [Kč/rok]

$Q_{EL,RES}^{OBPS}$ je el. energie distribuovaná do RES OBPS [MWh/rok]

$$Q_{EL,RES}^{OBPS} = 10519 \text{ MWh/rok}$$

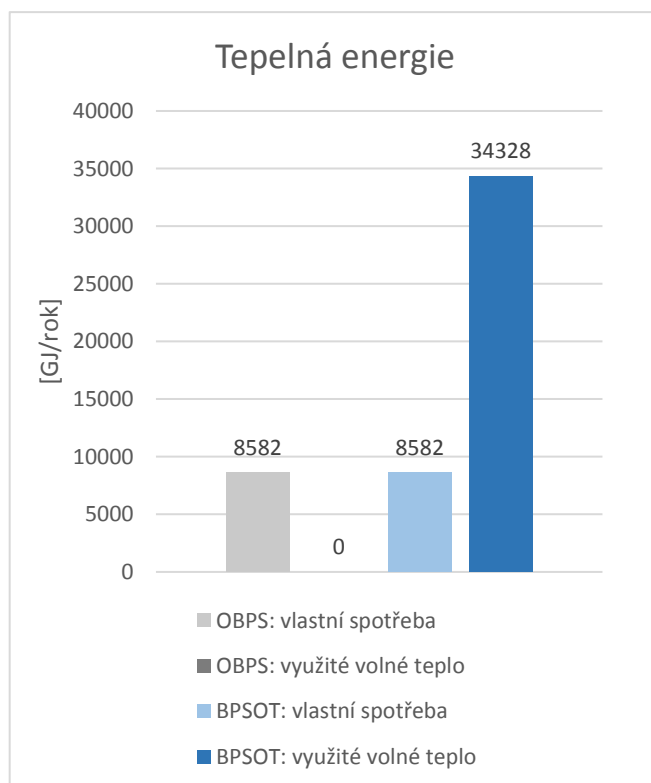
$Q_{EL,RES}^{BPSOT}$ je el. energie distribuovaná do RES BPSOT [MWh/rok]

$$Q_{EL,RES}^{BPSOT} = 10061 \text{ MWh/rok}$$

C_{EL} je výkupní cena elektřiny pro BPS [Kč/MWh]

$$C_{EL} = 4120 \text{ Kč/MWh}^{35}$$

Velký rozdíl mezi oběma BPS je v hospodaření s přebytečným teplem. Obě stanice spotřebují 20 % z celkového množství vyrobeného tepla pro vlastní chod (především k vytápění fermentorů). Zbývajících 80 % volného tepla má BPS k dispozici k dalšímu využití. Zatímco OBPS toto teplo žádným způsobem neaplikuje a maří ho do okolí, BPSOT přebytečné teplo maximálně využívá k odpaření zbytkové vody z odseparovaného fugátu v odpařovacím systému. Obrázek 43 znázorňuje jednotlivé podíly tepelné energie bilancovaných BPS.



Obrázek 43: Hospodaření s tepelnou energií v rámci zmíněných BPS

³⁵ Výkupní cena elektřiny u BPS využívajících biomasu je 4120 Kč/MWh v případě, že je splněna podmínka uplatnění užitečného tepla minimálně v úrovni 10 % vůči vyrobené elektřině z obnovitelných zdrojů. Není-li podmínka splněna, výkupní cena elektřiny u takovýchto BPS je 3550 Kč/MWh [47]. Obě uvažované BPS zmiňovanou podmínku splňují.

CELKOVÉ ZHODNOCENÍ NÁVRHU

BPSOT představuje pokročilejší typ BPS, jejíž snahou je maximálně využít volnou energii i vedlejší produkty a tím přispět k efektivnějšímu provozu stanice z hlediska ekologie a ekonomiky. BPS disponují značným množstvím přebytečného tepla, které – není-li využíváno např. k vytápění přilehlých objektů či distribuováno do CZT – je vhodné aplikovat k úpravě FZ. Výsledkem přídatného zpracování digestátu je citelná redukce jeho objemu, což v důsledku vede ke snížení nákladů na uskladnění a přepravu FZ. Další výhodou odvodnění FZ je zisk nových vedlejších produktů, které lze dále zpracovávat či jimi nahradit původní suroviny (např. kondenzátem z odpařovacího systému zastoupit procesní vodu).

Provoz přídatných zařízení potřebných pro odvodnění digestátu (v tomto případě šnekový lis a odpařovací systém) znamená jistou energetickou (a tedy i finanční) zátěž. Zmíněné technologie spotřebovávají pro svůj chod určité množství elektrické energie a snižují tak množství volné elektrické energie, která může být distribuována do RES. To představuje hlavní ekonomickou ztrátu pro provozovatele BPSOT.

Nicméně, celkový roční provoz BPSOT vychází z ekonomického hlediska úsporněji oproti OBPS – rovnice (48) vyjadřuje rozdíl ročních provozních nákladů obou BPS: ³⁶

$$\dot{U}_{tot}^N = N_{DOP}^{\dot{U}S} + N_{PV}^{\dot{U}S} + Z_{EL}^{\dot{U}B} = \mathbf{463\,927\,Kč/rok} \quad (48)$$

| | | |
|------|----------------------|--|
| kde: | \dot{U}_{tot} | je celková úspora nákladů na roční provoz BPSOT [Kč/rok] |
| | $N_{DOP}^{\dot{U}S}$ | je úspora nákladů na dopravu výstupního materiálu [Kč/rok] |
| | $N_{PV}^{\dot{U}S}$ | je úspora nákladů na procesní vodu [Kč/rok] |
| | $Z_{EL}^{\dot{U}B}$ | je úbytek potenciálního zisku z prodané elektřiny [Kč/rok] |

Nižší roční provozní náklady vyznívají ve prospěch BPSOT a pro provozovatele BPS je tak zařazení odvodňovacích technologií FZ do provozu stanice zajímavou investicí. Další nezpochybnitelnou výhodou BPSOT je její ekologičtější provoz, jež bude v nadcházejících letech stále více vyžadován.

³⁶ Rovnice (48) porovnává provozní náklady obou stanic – nejsou zde uvažovány investiční náklady na přídatná zařízení. Investiční náklady potřebné k pořízení odvodňovací technologie budou odlišné pro jednotlivé konkrétní BPS (rolí zde budou hrát mj. množství zpracovaných surovin, produkce digestátu, dostupnost volné energie, potenciál využití vedlejších produktů a další). Nicméně, lze předpokládat, že investiční náklady by se pohybovaly v řádu milionu korun. V tomto případě by doba návratnosti investice s největší pravděpodobností náležela do intervalu 5 až 20 let.

6 Závěr

Diplomová práce si kladla za cíl představit technologie vhodné ke zpracování fermentačních zbytků (FZ) z provozu bioplynových stanic (BPS) a navrhnout integraci vybrané odvodňovací technologie v BPS. Hlavní motivací úpravy FZ (digestátu) v BPS je redukce jeho objemu a zvýšení koncentrace živin v něm obsažených. Nezpracovaný digestát obsahuje značné množství vody (až 90 %), což má za následek poměrně vyšší náklady na jeho skladování a přepravu k dalšímu využití. Využití odvodňovacích technologií k úpravě FZ tak výrazně přispěje ke snížení těchto nákladů. Další výhodou zpracování digestátu je možnost k odvodňovacím procesům využít odpadního tepla z kogenerační jednotky (KJ). BPS ve většině případů disponují jistým množstvím přebytné tepelné energie, jež může být efektivně využita právě ke zmíněným účelům. Významnou roli v opodstatnění úpravy FZ hrají rovněž environmentální a legislativní omezení, která definují požadavky na nakládání s digestátem a na jeho kvalitu.

Na základě provedené rešerše lze technologie vhodné k úpravě FZ rozdělit do dvou hlavních skupin: technologie/zařízení, která zpracovávají původní digestát, a technologie/zařízení, jež dále upravují jeho separované složky. Separace tuhé a kapalné frakce FZ se provádí např. pomocí šnekového lisu, dekantací odštědivky či pásových separátorů. Tuhá frakce (separát) se může kompostovat nebo sušit a použít k výrobě tuhých alternativních paliv. Cílem další úpravy tekuté frakce (fugát) je vytvoření koncentráту a vyčištění odpadní vody. Koncentrát se aplikuje jako hnojivo na zemědělské půdě, čistá odpadní voda může být využívána v areálu BPS. K nejčastěji používaným odvodňovacím technologiím fugátu patří odpařování, membránové technologie či stripování amoniaku.

Hlavní náplní diplomové práce bylo srovnat provozy dvou různých BPS a zhodnotit návrh integrace vybrané odvodňovací technologie ve zvolené BPS. Prvním druhem BPS byla tzv. obecná bioplynová stanice (OBPS). OBPS vyprodukovaný digestát žádným způsobem neupravuje a aplikuje ho na zemědělské půdě jako hnojivo. Druhým typem byla bioplynová stanice s odvodňovací technologií (BPSOT). BPSOT je v podstatě OBPS rozšířená o přídatná zařízení ke zpracování digestátu. V tomto případě byla zvolena následující úprava FZ: separace tuhé a kapalné složky šnekovým lisem a následné odpaření zbytkové vody z fugátu v odpařovacím systému. Separát z prvního kroku zpracování představuje konečný produkt, finálním produktem úpravy fugátu je jeho koncentrát a kondenzát o ideální čistotě.

V této fázi diplomové práce byly provedeny materiálové a energetické bilance obou zmíněných stanic. Materiálové bilance BPS se liší především v koncovém množství vedlejších produktů (zfermentovaného materiálu). V případě OBPS je produkce výstupního digestátu více jak dvojnásobná než celkové množství zahuštěného fugátu a separátu z BPSOT (obrázek 41). Dalším velkým rozdílem mezi BPS je spotřeba externí procesní vody. BPSOT je totiž schopná veškerý podíl této suroviny nahradit kondenzátem z odpařovacího systému. Tato skutečnost je kvitována z hlediska ekonomického i environmentálního.

Tím, že byly zvoleny pro obě stanice stejné výchozí parametry (druh i množství vstupních surovin, typ KJ aj.), disponují zmíněné stanice rovnocenným množstvím bioplynu, a tedy i elektrické a tepelné energie. Energetické bilance obou stanic se značně podobají: část energie (elektrické či tepelné) spotřebuje stanice pro vlastní provoz, zbývající přebytnou energii má BPS k dispozici k dalšímu využití. V případě elektrické energie

je její přebytečná část distribuována do rozvodné elektrické sítě (RES). BPSOT disponuje menším množstvím přebytečné elektrické energie, neboť jí pro vlastní chod spotřebuje více (vliv přítomnosti dvou přídatných zařízení). To má za následek snížení potenciálního zisku pro BPSOT z prodané elektřiny do RES. Hospodaření s elektrickou energií obou BPS dokládá obrázek 42. Způsob využívání tepelné energie (zvláště pak té přebytečné) je naprosto odlišný pro dané stanice. Obě BPS mají k dispozici stejné množství zbytkového tepla (80 % z vyrobeného tepla). Zatímco BPSOT jej maximálně využívá v odpařovacím systému, OBPS přebytečné teplo maří do okolí (obrázek 43). BPSOT nabízí efektivní zúžitkování veškeré energie.

Zmíněné odlišnosti v materiálových a energetických bilancích jednotlivých stanic mají za následek rovněž rozdíly v ekonomice provozu obou BPS. Roční provozní náklady vynášejí ve prospěch BPSOT – rovnice (48). Investice do odvodňovací technologie digestátu je tak zajímavá nejen z environmentálního hlediska ale pro provozovatele BPS rovněž i z ekonomického.

Účelem této práce bylo čtenářům představit technologie používané při zpracování FZ, včetně jejich vlivu na provoz BPS. Z rešeršní části diplomové práce vyplývá, že existuje řada odvodňovacích technologií, které lze vzájemně kombinovat. Tato práce tak může být výchozím krokem pro integraci vybrané technologie do reálného provozu BPS nebo může sloužit jako inspirace či srovnání pro návrh nové integrace zmíněných technologií v BPS.

Seznam použité literatury

- [1] Co je to bioplynová stanice? *EnviWeb* [online]. 2012 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: http://www.enviweb.cz/page/co_je_to_bioplynka
- [2] *Desatero bioplynových stanic aneb zásady efektivní výstavby a provozu bioplynových stanic v zemědělství* [online]. Praha: Ministerstvo zemědělství, 2007 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://eagri.cz/public/web/mze/zivotni-prostredi/obnovitelne-zdroje-energie/bioplyn/bps/desatero-bioplynovych-stanic.html>
- [3] Technologie bioplynových stanic. *Enviton* [online]. 2008 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.bioplynovestanice.cz/technologie-bps/>
- [4] Nakládání s digestátem, možnost využití jako kvalitní hnojivo. *Biom.cz* [online]. 2014 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/nakladani-s-digestatem-moznost-vyuziti-jako-kvalitni-hnojivo>
- [5] Bioplynové stanice. *Power-Energo* [online]. 2011 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.power-energo.cz/produkty/bioplynove-stanice.html>
- [6] Kvašení. *Wikipedia* [online]. 2017 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Kva%C5%A1en%C3%AD>
- [7] SCHULZ, Heinz a Barbara EDER. *Bioplyn v praxi: Teorie - projektování - stavba zařízení - příklady*. Přeložila Marie Šedivá; redigoval Miroslav Hrdina. 1. vydání. Ostrava: HEL, 2014. ISBN 80-86167-21-6.
- [8] KRATOCHVÍLOVÁ, Zuzana a kol. *Průvodce výrobou a využitím bioplynu* [online]. Praha: CZ Biom, 2009 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: http://biom.cz/upload/6e01d6d4c4835ec93cda508772f3bf6e/pruvodce_vyrobu_vyuzitim_bioplynu.pdf
- [9] Volba vhodné kogenerační jednotky na bioplyn. *Biom.cz* [online]. 2014 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/volba-vhodne-kogeneracni-jednotky-na-bioplyn>
- [10] Bioplynová stanice. *Nazeleno.cz* [online]. 2015 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.nazeleno.cz/bioplynova-stanice.dic>
- [11] KOCIÁN, Oldřich. *Návrh bioplynové stanice* [online]. Brno, 2009 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_ve-rejne.php?file_id=17545. Diplomová práce.
- [12] GERŠL, Milan a kol. *Mineralogicko-chemická charakteristika fermentačních zbytků při výrobě bioplynu a možnosti jejich využití pro zlepšení vlastností půd* [online]. Mendelova univerzita v Brně, 2014 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: http://eagri.cz/public/web/file/357316/Mineralogicko_chemicka_charakteristika_MZe_2014_de-vzdana_prace__tisk.pdf
- [13] Vzduch. *Wikipedia* [online]. 2017 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Vzduch>

- [14] DOŠEK, Michal, Marek HOLBA a Michal ČERNÝ. Technologie vs. fermentační zbytek. *Odpadové fórum* [online]. 2015 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.odpadoveforum.cz/TVIP2015/prispevky/033.pdf>
- [15] DROSG, Bernhard, Werner FUCHS, Teodorita AL SEADI, Michael MADSEN a Bernd LINKE. *Nutrient Recovery by Biogas Digestate Processing* [online]. IEA Bionergy, 2015 [cit. 2017-05-22]. ISBN 978-1-910154-16-8. Dostupné z: http://www.iea-biogas.net/files/daten-redaktion/download/Technical%20Brochures/NUTRIENT_RECOVERY_RZ_web1.pdf
- [16] ARBOR. *Inventory: Techniques for nutrient recovery from digestate* [online]. 2013 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: http://www.vcm-mestverwerking.be/publicationfiles/VCM001_Rapport_04_LR.pdf
- [17] BABIČKA, Luboš, Kristýna VÁCLAVÍKOVÁ, Lenka KOUŘIMSKÁ a František STRAKA. *Využití digestátu jako organického hnojiva aneb výhody bioplynu v resortu zemědělství* [online]. 2008 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://www.biomasa-info.cz/cs/doc/hnojivo.pdf>
- [18] KUŽEL, Stanislav. Jak efektivně využít digestát z bioplynových stanic? *Energie* 21. 2010, (3), 16-17.
- [19] Digestate Factsheet: the value of organic fertilisers for Europe's economy, society and environment. In: *EBA* [online]. 2015 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://european-biogas.eu/wp-content/uploads/2015/07/Digestate-paper-final-08072015.pdf>
- [20] VAN KAUWENBERGH, Steven J. World Phosphate Rock Reserves and Resources. In: *IFDC* [online]. 2010 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/Pnadw835.PDF
- [21] CZBA. *Strategická výzkumná agenda oboru bioplyn* [online]. 2010 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: [http://www.czba.cz/files/ceska-bioplynova-asociace/uploads/files/SVA_CzBA_duben_2010_verze_final\(1\).pdf](http://www.czba.cz/files/ceska-bioplynova-asociace/uploads/files/SVA_CzBA_duben_2010_verze_final(1).pdf)
- [22] Produkty anaerobní digesce. *Biologické metody zpracování odpadů* [online]. 2016 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: http://hgf10.vsb.cz/546/bmzo/pages/Produkty_anaerobni_digesce.html
- [23] DVOŘÁČEK, Tomáš. Tekutý digestát (fugát). In: *Biom.cz* [online]. [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/obrazek/tekuty-digestat-fugat>
- [24] WEILAND, P. *Gärrestaufbereitung*. 2008. 17. Symposium Bioenergie, 20.-21.11.2008, Kloster Banz, Bad Staffelstein, Germany. In DROSG, Bernhard, Werner FUCHS, Teodorita AL SEADI, Michael MADSEN a Bernd LINKE. *Nutrient Recovery by Biogas Digestate Processing* [online]. IEA Bionergy, 2015 [cit. 2017-05-22]. ISBN 978-1-910154-16-8. Dostupné z: http://www.iea-biogas.net/files/daten-redaktion/download/Technical%20Brochures/NUTRIENT_RECOVERY_RZ_web1.pdf
- [25] WENDLAND, Matthias. *Biogasgärreste: Einsatz von Gärresten aus der Biogasproduktion als Düngemittel* [online]. Biogas Forum Bayern, 2012 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ipz/dateien/leitfaden_2012-03_biogasforum.pdf

- [26] DANETV. *Verification Statement for GEA Westfalia decanter centrifuge for post-treatment of digested biomass* [online]. The Danish Centre for Verification of Climate and Environmental Technologies, 2010 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: http://www.etv-denmark.com/files/energy/GEA_Post_Treatment_Verification_Statement.pdf
- [27] FRISCHMANN, Pell. *Enhancement and treatment of digestates from anaerobic digestion* [online]. 2012 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/Digestates%20from%20Anaerobic%20Digestion%20A%20review%20of%20enhancement%20techniques%20and%20novel%20digestate%20products_0.pdf
- [28] CVRČKOVÁ, Romana, Barbora LYČKOVÁ, Silvie HEVIÁNKOVÁ a Radmila KUČEROVÁ. *Ověření možnosti zpracování digestátu vermikompostováním* [online]. 2015 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://www.odpadoveforum.cz/TVIP2015/prispevky/008.pdf>
- [29] KÁRA, Jaroslav a Roman KOUTNÝ. *Využití fermentačních zbytků anaerobní digesce jako paliva* [online]. *Biom.cz*, 2010 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyuziti-fermentacnich-zbytku-anaerobni-digesce-jako-paliva>
- [30] Biouhel. *Biouhel.cz* [online]. [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://biouhel.cz/>
- [31] SLÁVIK, Andrej a Milan UHER. *Membránové procesy při úpravě vod*. In: *Asio* [online]. 2014 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://www.asio.cz/cz/247.membranove-procesy-pri-uprave-vod>
- [32] HEIDLER, Burkhard. *Gärrestaufbereitung durch Separierung und Eindampfung* [online]. Norddeutsche Biogastagung, 2005 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://biogas-infoboard.de/pdf/Heidler%20aus%202.%20Nordde.%20Biogas-Tagung%20Hildesh-16.pdf>
- [33] KÁRA, Jaroslav, Zdeněk PASTOREK a Evžen PŘIBYL. *Výroba a využití bioplynu v zemědělství* [online]. Praha: VÚZT, 2007 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://www.vuzt.cz/svt/vuzt/publ/P2007/086.PDF>
- [34] *Bioplynová stanice Slavkov u Brna* [online]. Bioprofit, 2010 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: https://portal.cenia.cz/eiasea/download/RU-IBX0piTTg0NF9vem5hbWVuaURPQ18xLnBkZg/JHM844_oznameni.pdf
- [35] *TCG 2016 C* [online]. MWM [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: http://powrmgt.com/wp-content/themes/sliding-door/img/us_mwm_tcg2016c_60hz_0912%5B1%5D-1.pdf
- [36] MUŽÍK, Oldřich a Jaroslav KÁRA. *Možnosti výroby a využití bioplynu v ČR* [online]. *Biom.cz*, 2009 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/moznost-vyroby-a-vyuziti-bioplynu-v-cr>
- [37] Vzduch. *ConVERTER* [online]. 2002 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/vzduch.htm>
- [38] *Zařízení na zpracování digestátu* [online]. SEPCOM Biogas, 2016 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: https://www.has.cz/storage/app/media/separatory-a-zarizeni-docistiren/prospekt-SEPCOM_BIOGAS_CZ_1016.pdf
- [39] SMATANOVÁ, Michaela. *Digestát jako organické hnojivo*. *Zemědělec* [online]. 2012, (18), 21-22 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: http://eagri.cz/public/web/file/233740/Digestat_jako_organicke_hnojivo.pdf

- [40] Perzistentní organická látka. In: *Wikipedia* [online]. 2017 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Perzistentn%C3%AD_organick%C3%A1_l%C3%A1tk%C3%A1
- [41] VANEECKHAUTE, Céline a kol. *Nutrient recovery from bio-digestion waste water streams and re-use as renewable fertilizers* [online]. Universiteit Gent, 2013 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <https://biblio.ugent.be/publication/4115287/file/4115288.pdf>
- [42] NESET, T.S. a D. CORDELL. *Global phosphorus scarcity: identifying synergies for a sustainable future*. J. Sci. Food Agric. 2012, 2-6. In DROSG, Bernhard, Werner FUCHS, Teodorita AL SEADI, Michael MADSEN a Bernd LINKE. *Nutrient Recovery by Biogas Digestate Processing* [online]. IEA Bionergy, 2015 [cit. 2017-05-22]. ISBN 978-1-910154-16-8. Dostupné z: http://www.iea-biogas.net/files/daten-redaktion/download/Technical%20Brochures/NUTRIENT_RECOVERY_RZ_web1.pdf
- [43] VONDRA, Marek. *Zařízení pro zahušťování odpadní vody z bioplynových stanic*. Brno, 2017. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
- [44] Vývoj cen pohonných hmot. CCS [online]. [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://www.ccs.cz/phm>
- [45] Voda. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Voda>
- [46] Cena vody 2017. *Skrblik.cz* [online]. 2017 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <https://www.skrblik.cz/energie/voda/cena-vody/>
- [47] *Energetický regulační věstník* [online]. Energetický regulační úřad, 2016 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: https://www.eru.cz/documents/10540/2041142/ERV_12_2016/058c6730-a61f-4606-a51b-e72ada54c052

Seznam použitých symbolů, indexů a zkratek

| <i>SYMBOLY</i> | <i>VÝZNAM</i> | <i>JEDNOTKA</i> |
|----------------|-------------------------------|----------------------|
| <i>C</i> | cena | [Kč] |
| <i>L</i> | vzdálenost (dopravní) | [km] |
| <i>LHV</i> | výhřevnost | [kJ/m ³] |
| <i>m</i> | hmotnostní tok | [kg/h] |
| <i>N</i> | náklady | [Kč/rok] |
| <i>η</i> | účinnost | [-] |
| <i>ρ</i> | hustota | [kg/m ³] |
| <i>Q</i> | energie | [kW] |
| <i>S</i> | spotřeba (paliva) | [l/km] |
| <i>V</i> | objemový tok | [m ³ /h] |
| <i>v</i> | teoretická výtěžnost bioplynu | [m ³ /kg] |
| <i>x</i> | hmotnostní koncentrace | [-] |
| <i>Z</i> | zisk | [Kč/rok] |

| <i>INDEXY</i> | <i>VÝZNAM</i> |
|-----------------------|--|
| <i>A</i> | sušina |
| <i>A, org.</i> | organická sušina |
| <i>air</i> | vzduch |
| <i>BP</i> | bioplyn |
| <i>BPSOT</i> | bioplynová stanice s odvodňovací technologií |
| <i>č.mat.</i> | čerstvý materiál |
| <i>dig</i> | digestát |
| <i>dig.recykl</i> | recykl digestátu |
| <i>DOP</i> | dopravní |
| <i>fug</i> | fugát |
| <i>H₂O</i> | voda |
| <i>hm.</i> | hmotnostní |

| | |
|-----------------|--|
| <i>kap</i> | kapacita |
| <i>kond</i> | kondenzát |
| <i>KJ</i> | kogenerační jednotka |
| <i>NV</i> | nákladní vůz |
| <i>obj.</i> | objemové |
| <i>OBPS</i> | obecná bioplynová stanice |
| <i>org. suš</i> | organická sušina |
| <i>OS</i> | odpařovací systém |
| <i>P</i> | přebytek |
| <i>ph</i> | pohonné hmoty |
| <i>PV</i> | procesní voda |
| <i>RES</i> | rozvodná elektrická síť |
| <i>sep</i> | separát |
| <i>ŠL</i> | šnekový lis |
| <i>TEP</i> | tepelná (energie) |
| <i>tot</i> | celkový (podíl/účinnost) |
| <i>ÚS</i> | úspora |
| <i>V12</i> | kogenerační jednotka TCG2016C V12 |
| <i>VS</i> | vlastní spotřeba |
| <i>V16</i> | kogenerační jednotka typu TCG2016C V16 |
| <i>ZT</i> | ztráty (energie) |

| | |
|----------------|---------------|
| <u>ZKRATKY</u> | <u>VÝZNAM</u> |
|----------------|---------------|

| | |
|--------------|--|
| <i>BP</i> | bioplyn |
| <i>BPS</i> | bioplynová stanice |
| <i>BPSOT</i> | bioplynová stanice s odvodňovací technologií |
| <i>BRKO</i> | biologicky rozložitelné komunální odpady |
| <i>BRO</i> | biologicky rozložitelné odpady |
| <i>CZT</i> | centrální zásobování teplem |
| <i>ČOV</i> | čistírna odpadních vod |

| | |
|-------------|-----------------------------------|
| <i>ČR</i> | Česká republika |
| <i>DVP</i> | doplňující výchozí parametr |
| <i>EU</i> | Evropská unie |
| <i>FZ</i> | fermentační zbytky |
| <i>CHSK</i> | chemická spotřeba kyslíku |
| <i>KJ</i> | kogenerační jednotka |
| <i>MB</i> | materiálová bilance |
| <i>MEB</i> | materiálová a energetická bilance |
| <i>OBPS</i> | obecná bioplynová stanice |
| <i>PN</i> | přípravná nádrž |
| <i>RES</i> | rozvodná elektrická síť |
| <i>SV</i> | spalovací vzduch |
| <i>VŽP</i> | vedlejší živočišné produkty |

CHEMICKÉ VZORCE VÝZNAM

| | |
|--------------------------------------|----------------------------|
| <i>C</i> | uhlík |
| <i>Ca</i> | vápník |
| <i>CaO</i> | oxid vápenatý |
| <i>CH₄</i> | metan |
| <i>C_nH_{2n+2}</i> | uhlovodíky |
| <i>Co</i> | kobalt |
| <i>CO₂</i> | oxid uhličitý |
| <i>DDT</i> | dichlordifenyltrichloreten |
| <i>Fe</i> | železo |
| <i>H</i> | vodík |
| <i>H₂O</i> | voda/vodní pára |
| <i>H₂S</i> | sirovodík |
| <i>H₂SO₄</i> | kyselina sírová |
| <i>K</i> | draslík |
| <i>K₂O</i> | oxid draselný |

| | |
|--------------|------------------------------|
| Mg | hořčík |
| $MgNH_4PO_4$ | fosforečnan hořečnato-amonný |
| MgO | oxid hořečnatý |
| Mo | molybden |
| N | dusík |
| N_{ORG} | organický dusík |
| Na | sodík |
| NH_3 | amoniak |
| NH_4^+ | amonný kation |
| NH_4^+-N | amoniakální dusík |
| Ni | nikl |
| NO_x | oxidy dusíku |
| $NO_3^- - N$ | dusičnanový dusík |
| N_2O | oxid dusný |
| O | kyslík |
| P | fosfor |
| PO_4^{3-} | fosfát |
| $PO_4^- - P$ | fosforečnanový fosfor |
| P_2O_5 | oxid fosforečný |
| S | síra |
| Se | selen |

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| OBRÁZEK 1: SCHÉMA BPS | 3 |
| OBRÁZEK 2: TEORETICKÁ VÝTĚŽNOST BIOPLYNU Z JEDNOTLIVÝCH SUROVIN | 6 |
| OBRÁZEK 3: PROCES ANAEROBNÍHO ROZKLADU | 7 |
| OBRÁZEK 4: HADICOVÝ APLIKÁTOR | 13 |
| OBRÁZEK 5: PŘEHLED MOŽNOSTÍ ZPRACOVÁNÍ FZ | 14 |
| OBRÁZEK 6: TUHÁ FRAKCE – SEPARÁT | 15 |
| OBRÁZEK 7: TEKUTÁ FRAKCE – FUGÁT | 15 |
| OBRÁZEK 8: ŠNEKOVÝ LIS | 16 |
| OBRÁZEK 9: DEKANTAČNÍ ODSTŘEDIVKA | 17 |
| OBRÁZEK 10: DISKONTINUÁLNÍ ODSTŘEDIVKA | 18 |
| OBRÁZEK 11: TLAKOVÝ PÁSOVÝ SEPARÁTOR | 18 |
| OBRÁZEK 12: VAKUOVÝ PÁSOVÝ SEPARÁTOR | 19 |
| OBRÁZEK 13: PRINCIPY SUŠENÍ FZ – KONVEKCI (VLEVO), PŘÍMÝM KONTAKTEM (VPRAVO) | 20 |
| OBRÁZEK 14: PÁSOVÁ SUŠÁRNA | 21 |
| OBRÁZEK 15: BRIKETY ZE SEPARÁTU A RŮZNÝCH DRUHŮ BIOMASY | 21 |
| OBRÁZEK 16: BIOUHEL ZE SEPARÁTU | 22 |
| OBRÁZEK 17: STRIPOVÁNÍ AMONIAKU VZDUCHEM | 23 |
| OBRÁZEK 18: STRUVIT VYSRÁŽENÝ VE FORMĚ KRYSTALŮ (VLEVO), STRUVITOVÉ PELETY (VPRAVO) | 23 |
| OBRÁZEK 19: PRINCIP MEMBRÁNOVÉ SEPARACE | 24 |
| OBRÁZEK 20: PŘEHLED MEMBRÁNOVÝCH PROCESŮ | 24 |
| OBRÁZEK 21: VÍCESTUPŇOVÝ ODPAŘOVACÍ SYSTÉM | 25 |
| OBRÁZEK 22: SCHÉMA OBPS | 30 |
| OBRÁZEK 23: PŘEHLED MATERIÁLOVÝCH PROUDŮ V OBPS | 31 |
| OBRÁZEK 24: MATERIÁLOVÁ BILANCE PŘÍPRAVNÉ NÁDRŽE | 32 |
| OBRÁZEK 25: MATERIÁLOVÁ BILANCE FERMENTORU | 33 |
| OBRÁZEK 26: MATERIÁLOVÁ BILANCE FERMENTORU | 34 |
| OBRÁZEK 27 MATERIÁLOVÁ BILANCE FERMENTAČNÍ ČÁSTI OBPS | 34 |
| OBRÁZEK 28: MATERIÁLOVÁ BILANCE KOGENERAČNÍ JEDNOTKY | 35 |
| OBRÁZEK 29: MATERIÁLOVÁ BILANCE OBPS | 36 |
| OBRÁZEK 30: PŘEHLED ENERGETICKÝCH TOKŮ V OBPS | 37 |
| OBRÁZEK 31: ENERGETICKÁ BILANCE OBPS | 39 |
| OBRÁZEK 32: SCHÉMA BPS S ODVODŇOVACÍ TECHNOLOGIÍ DIGESTÁTU | 40 |
| OBRÁZEK 33: HORIZONTÁLNÍ ŠNEKOVÝ SEPARÁTOR SEPCOM | 41 |
| OBRÁZEK 34: PŘEHLED MATERIÁLOVÝCH PROUDŮ V BPSOT | 43 |
| OBRÁZEK 35: MATERIÁLOVÁ BILANCE ŠNEKOVÉHO LISU | 44 |
| OBRÁZEK 36: MATERIÁLOVÁ BILANCE ODPAŘOVACÍHO SYSTÉMU | 45 |
| OBRÁZEK 37: MATERIÁLOVÁ BILANCE FERMENTAČNÍ ČÁSTI BPSOT | 46 |
| OBRÁZEK 38: MATERIÁLOVÁ BILANCE BPSOT | 47 |
| OBRÁZEK 39: PŘEHLED ENERGETICKÝCH TOKŮ V BPSOT | 48 |
| OBRÁZEK 40: ENERGETICKÁ BILANCE BPSOT | 49 |
| OBRÁZEK 41: POROVNÁNÍ ROČNÍ PRODUKCE VÝSTUPNÍHO MATERIÁLU OBOU BPS | 51 |
| OBRÁZEK 42: NAKLÁDÁNÍ S ELEKTRICKOU ENERGIÍ V RÁMCI OBOU BPS | 53 |
| OBRÁZEK 43: HOSPODAŘENÍ S TEPELNOU ENERGIÍ V RÁMCI ZMÍNĚNÝCH BPS | 54 |

Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| TABULKA 1: PRŮMĚRNÉ SLOŽENÍ BIOPLYNU | 8 |
| TABULKA 2: SPALOVACÍ PARAMETRY BIOPLYNU A DALŠÍCH HOŘLAVÝCH PLYNŮ | 9 |
| TABULKA 3: PRŮMĚRNÉ VLASTNOSTI A SLOŽENÍ DIGESTÁTU | 10 |
| TABULKA 4: VLIV VSTUPNÍHO SUBSTRÁTU NA SLOŽENÍ DIGESTÁTU | 11 |
| TABULKA 5: VLIV PRŮBĚHU PROCESU FERMENTACE NA SLOŽENÍ DIGESTÁTU | 11 |
| TABULKA 6: SLOŽENÍ PEVNÉ A KAPALNÉ FRAKCE PO SEPARACI ŠNEKOVÝM LISEM | 16 |
| TABULKA 7: PARAMETRY DEKANTAČNÍ ODSŘEDIVKY | 17 |
| TABULKA 8: PARAMETRY ODPAŘOVACÍHO PROCESU | 26 |
| TABULKA 9: VSTUPNÍ MATERIÁLY BPS | 27 |
| TABULKA 10: TECHNICKÉ PARAMETRY KJ | 28 |
| TABULKA 11: TECHNICKÉ PARAMETRY SEPARÁTORU | 41 |
| TABULKA 12: TECHNICKÉ PARAMETRY VÍCESTUPŇOVÉHO ODPAŘOVACÍHO SYSTÉMU..... | 42 |
| TABULKA 13: TECHNICKÉ PARAMETRY VÍCESTUPŇOVÉHO ODPAŘOVACÍHO SYSTÉMU..... | 50 |
| TABULKA 14: PŘEHLED DOSTUPNÝCH ENERGÍÍ V OBOU TYPECH BPS | 53 |

Seznam příloh

Příloha č. 1: *Materiálová a energetická bilance BPS*